

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

SIDNEI PEREIRA

**TRANSFORMADA *WAVELET* NA ANÁLISE DE OSCILOGRAFIAS**

ESTUDO ESPECIAL

PATO BRANCO

2014

SIDNEI PEREIRA

## **TRANSFORMADA *WAVELET* NA ANÁLISE DE OSCILOGRAFIAS**

Estudo Especial, apresentado ao curso strictu sensu de Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco.

Orientador da Pesquisa: Prof. Dr. Miguel Moreto.

PATO BRANCO

2014

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rede de coleta de registros. ....	8
Figura 2: Registrador Digital de Perturbações Multifunções RPV-310. ....	11
Figura 3: Exemplos de registro de oscilografia: arquivo de configuração (.cfg).....	14
Figura 4: Exemplos de registro de oscilografia: arquivo de dados (.dat) .....	15
Figura 5: Exemplos de registro de curta duração. ....	16
Figura 6: Exemplos de registro de longa duração. ....	17
Figura 7: Exemplos de registro de sequencia de eventos. ....	17
Figura 8: a) Sinal contínuo no tempo. b) Decomposição feita pela FT em sinais de frequências fundamentais. ....	29
Figura 9: a) Sinal discreto no tempo. b) Magnitude dos fasores de frequências distintas que compõem o sinal discreto, obtidas a partir da DFT. ....	30
Figura 10: a) Sinal de registro de oscilografia. b) Frequências que compõem o sinal, obtidas a partir da FT. ....	31
Figura 11: Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT). ....	31
Figura 12: a) Trecho de registro de oscilografia com perturbação. b) registro de oscilografia de curta duração. c) Plano tempo versus frequência, obtido pela STFT. ....	33
Figura 13: Resolução no plano tempo-frequência a) Obtido pela STFT b) Obtido pela WT. ....	34
Figura 14: <i>Wavelet</i> de Haar. ....	36
Figura 15: <i>Wavelet</i> Chapéu Mexicano. ....	37
Figura 16: <i>Wavelet</i> de Morlet. ....	37
Figura 17: <i>Wavelets</i> de Daubechies. ....	38
Figura 18: Decomposição wavelet com filtros. ....	41
Figura 19: Exemplo de <i>downsample</i> . a) Sinal original. b) Reamostrador. c) Sinal reamostrado. ....	41
Figura 20: Decomposição com banco de filtros. ....	42
Figura 21: Decomposição por banco de filtros na forma de espaços vetoriais. ....	42
Figura 22: Árvore de decomposição <i>wavelet</i> até o quinto nível. ....	43
Figura 23: Visualização da magnitude dos coeficientes de detalhe por escala de cores. ....	44
Figura 24: Visualização da magnitude dos coeficientes de detalhe. ....	44
Figura 25: Visualização das correntes e tensões da unidade geradora 2. ....	47
Figura 26: DWT da corrente de falta. ....	48
Figura 27: Coeficientes de detalhe d2 e d3. ....	49
Figura 28: Energia do coeficiente de detalhe d3. ....	50
Figura 29: Aumento brusco da energia do coeficiente de detalhe d3. ....	51
Figura 30: Visualização das correntes e tensões da unidade geradora. ....	52
Figura 31: DWT da tensão fase A. ....	53
Figura 32: Coeficientes de detalhe d2 e d3. ....	54
Figura 33: Energia do coeficiente de detalhe d3. ....	55
Figura 34: Aumento brusco da energia do coeficiente de detalhe d3. ....	55

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Publicações: objetivo da aplicação versus ferramenta utilizada. ....	26
Quadro 2: Famílias de <i>wavelets</i> .....	39
Quadro 3: Características da unidade geradora.....	46

## LISTA DE SIGLAS

AMR	Análise multiresolução
Aneel	Agência nacional de energia elétrica
Chesf	Companhia hidroelétrica do São Francisco
COMTRADE	<i>Common format for transiente data exchange</i>
COS	Centros de operação dos sistemas
CWT	Transformada <i>wavelet</i> contínua
DFT	Transformada discreta de Fourier
DWT	Transformada <i>wavelet</i> discreta
FFT	Transformada rápida de Fourier
FT	Transformada de Fourier
GPS	Sistema de posicionamento global
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LT	Linha de transmissão
ONS	Operador nacional do sistema
PDS	Processamento digital de sinais
PRODIST	Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional
QEE	Qualidade da energia elétrica
RAP	Relatório de análise de perturbação
RDP	Registrador digital de perturbação
SEP	Sistema elétrico de potência
SIN	Sistema interligado nacional
STFT	Transformada de Fourier de tempo curto
TPC	Transformador de potencial capacitivo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WT	Transformada <i>wavelet</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2. OSCILOGRAFIA.....</b>	<b>11</b>
2.2 APLICAÇÕES PARA A OSCILOGRAFIA.....	18
2.2.1 Análise da qualidade de energia .....	19
2.2.2 Diagnóstico de equipamentos .....	20
2.2.3 Diagnóstico dos sistemas de proteção .....	21
2.2.4 Localização de faltas.....	21
2.2.5 Detecção e classificação de faltas .....	22
2.2.5.1 Detecção de faltas.....	23
2.2.5.2 Classificação das faltas .....	24
2.3 FERRAMENTAS UTILIZADAS NA EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES.....	25
<b>3. FUNDAMENTOS DA TRANSFORMADA WAVELET .....</b>	<b>27</b>
3.1 POR QUE WAVELETS .....	27
3.2 A TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA - CWT .....	34
3.2.1 Famílias de <i>wavelets</i> .....	35
3.3 A TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA - DWT .....	39
3.4 ANÁLISE MULTIRESOLUÇÃO - AMR .....	40
3.5 APLICAÇÃO.....	43
<b>4. ESTUDOS DE CASO .....</b>	<b>46</b>
4.1 CASO 1: DESLIGAMENTO FORÇADO POR CURTO CIRCUITO .....	46
4.2 CASO 2: DESLIGAMENTO POR PERDA DE EXCITAÇÃO .....	52
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>57</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os geradores, transformadores e linhas de transmissão são componentes essenciais em um Sistema Elétrico de Potência (SEP). Dessa forma, o monitoramento destes equipamentos deve ser constante para assegurar sua correta operação, o fornecimento de energia e minimizar os custos decorrentes de uma eventual parada. Atualmente, além dos tradicionais e diversos dispositivos de proteção, os equipamentos do Sistema Interligado Nacional (SIN) são monitorados por Registradores Digitais de Perturbação (RDP), conhecidos também como oscilógrafos digitais. Estes equipamentos monitoram constantemente grandezas predefinidas do SEP, como por exemplo, as tensões, correntes e frequência, bem como os estados de dispositivos de proteção, chaves seccionadoras e disjuntores. Caso ocorra alguma variação nesses sinais que ultrapasse um limiar pré-estabelecido, ou caso ocorra atuação de funções de proteção ou chaveamentos, o equipamento cria um registro que pode ser acessado posteriormente (VARELA et al., 2009).

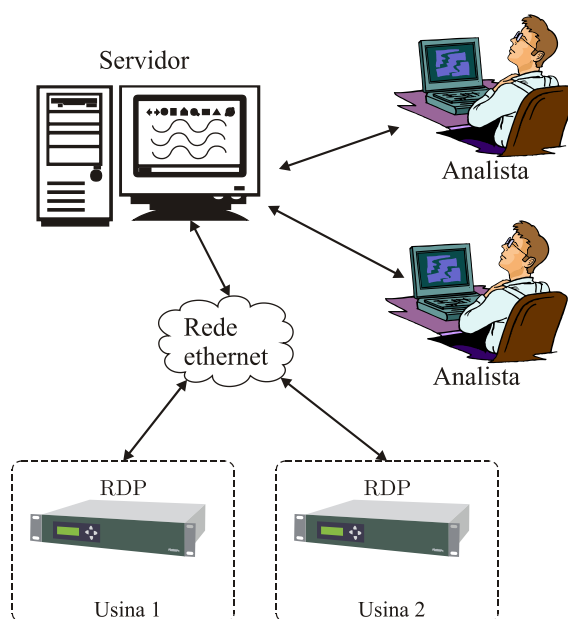
Um registro de oscilografia é composto por um conjunto de dados digitais dispostos em um formato padronizado e nomeado de COMTRADE pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) (IEEE STD, 2013). O padrão IEEE COMTRADE (*Common Format for Transient Data Exchange*) define um formato comum para os arquivos de dados digitais e assim um meio para intercâmbio de informações. Cada registro COMTRADE possui um conjunto de até quatro arquivos associados. Cada um dos quatro arquivos contém diferentes informações (SANTOS, 2011).

Em todo o processo de análise dos registros de oscilografias, o tempo de coleta dos dados e filtragem dos registros relevantes pode durar algumas horas (GIOVANINI et al., 2008). Somado a isto está o fato de que diversas ocorrências podem ser registradas por dia em uma empresa de geração ou transmissão de energia elétrica, sendo a maioria correspondente a procedimentos operativos normais, como energização e desenergização de geradores.

Os RDPs são ajustados com tal sensibilidade que garanta o registro de qualquer anormalidade no sistema, mesmo que esta não seja suficiente para produzir um blecaute de grandes proporções. Assim a quantidade de informações

registradas pelos RDPs é muito grande, produzindo uma demanda de trabalho para análise manual que por vezes a torna inviável (MORETO e ROLIM, 2010).

No atual modelo de operação do SIN o ONS desempenha a função de ditar as regras às quais os agentes do setor devem se submeter. Dentre estas regras, que são denominadas Procedimentos de Rede, encontra-se o Submódulo 11.6 que trata dos registros de perturbações. Este submódulo atribui aos agentes a responsabilidade de implantar um sistema de coleta de dados provenientes dos RDPs (ONS, 2009). Como os RDPs são dispositivos digitais essa coleta se dá através de uma rede de comunicação que permite acesso remoto aos dados e interliga os RDPs a um servidor remoto que centraliza as informações em um único local, como exemplifica a Figura 1.



**Figura 1: Rede de coleta de registros.**

**Fonte: (MORETO e ROLIM, 2010).**

É perceptível que essa rede de RDPs concentra e disponibiliza uma grande quantidade de dados aos analistas, gerando uma alta demanda de trabalho. Considerando que os oscilógrafos ou RDPs produzem registros dos sinais monitorados em formato digital torna-se possível o emprego de métodos computacionais para promover a análise destes registros. O próprio submódulo 11.6 do ONS recomenda aos agentes:

"É permitida a utilização de filtros automáticos, instalados no agente de transmissão, para descarte de registros ocasionados por partidas programadas dos RDP, para a verificação da condição de operação e



calibração desses registradores ou para a eliminação de partidas espúrias, tais como as decorrentes de manobras de seccionadoras." (ONS, 2009).

A rápida análise dos eventos, pela pós-operação, é de suma importância para diagnosticar a sua causa, permitindo agir sobre um possível defeito, minimizando a indisponibilidade de equipamentos ao SEP. Como o tempo despendido nas análises é crucial para a diminuição dos custos decorrentes da parada de um equipamento, é evidente a necessidade de uma metodologia capaz de gerar um diagnóstico da perturbação de forma automática, apontando para uma possível causa do problema e possibilitando priorizar a atenção do engenheiro especialista aos casos mais importantes. Dessa forma, o processo de análise de ocorrências se torna mais ágil e reduz-se o tempo de indisponibilidade de equipamentos. (MORETO e ROLIM, 2010) (DAVILA, 2010) (PEREIRA e SPRITZER, 2007).

O desenvolvimento de um sistema de análise automática de oscilografias deve levar em consideração o objetivo para o qual a análise será direcionada. A finalidade da análise irá determinar os dados (insumos) do registro de oscilografia a serem utilizados (registros de curta duração, registros fasorial, sequências de eventos). Antes de um sistema conseguir realizar uma análise faz-se necessário ainda uma etapa de extração de dados dos registros. Esta etapa utiliza ferramentas matemáticas para transformar as variações numéricas nos dados registrados em informações que possam ser comparadas com padrões de causas já conhecidas, conseguindo assim determinar o que gerou a perturbação.

Nesse contexto alguns métodos têm sido propostos, utilizando diferentes técnicas e ferramentas computacionais, para realizar a análise de forma automática dos registros dos RDPs. Lenz (2009) descreve o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para avaliar o desempenho de relés de proteção usando os dados dos RDPs e das Sequências de Eventos (SOE), produzidas pelos sistemas de supervisão e controle. Costa (2010) propôs uma técnica de diagnóstico de distúrbios transitórios no sistema de transmissão baseada na transformada *wavelet* para aplicação integrada ao desenvolvimento de novos RDPs. Moreto (2011) desenvolveu um sistema de análise automática para registros digitais de perturbações em unidades geradoras usando limiares exatos para classificar as causas dos eventos.

O foco deste Estudo Especial é assimilar conceitos matemáticos da transformada *wavelet*, bem como levantar o estado da arte quanto à aplicação deste método no processamento digital de sinais, estudar as ferramentas computacionais para implementação do método matemático “transformada *wavelet*” manipulando dados dos registros de oscilografias e extrair as características necessárias dos sinais;

O capítulo 2 deste estudo especial faz uma revisão sobre oscilografia explicitando o formato dos dados registrados e as possíveis aplicações para a análise destes dados. Na sequência, o capítulo 3, aborda a transformada *wavelet*, ferramenta matemática amplamente utilizada na análise de oscilografias.

## 2. OSCILOGRAFIA

O termo “oscilografia” refere-se aos registros produzidos pelos oscilógrafos. Estes são equipamentos desenvolvidos para registrar oscilações elétricas e o nome vem de “oscilar” + “grafo”, ou seja, escrita de oscilações (WEISZFLOG, 2004). Originalmente estes equipamentos eram dotados de agulhas registradoras conectadas a bobinas eletromagnéticas que transformavam oscilações de corrente elétrica em oscilações mecânicas na ponta de uma agulha, que por sua vez, literalmente, escreviam o registro da oscilação.

Com a evolução tecnológica os antigos oscilógrafos se modernizaram e passaram a ser chamados de Registradores Digitais de Perturbações, ou pela sigla RDPs, que atualmente se baseiam em tecnologia digital e mantem os registros em memória semicondutora. Porém, os profissionais do meio técnico e acadêmico se mantêm fiéis ao uso do termo oscilografia para se referir aos arquivos digitais produzidos pelos RDPs. A Figura 2 mostra um RDP moderno da Reason Tecnologia S.A.



**Figura 2: Registrador Digital de Perturbações Multifunções RVP-310.**  
**Fonte: (REASON, 2010).**

Este modelo tem sido largamente empregado pelas concessionárias de energia e possui as seguintes especificações técnicas (REASON, 2010):

- Até 64 entradas analógicas (tensão, corrente e transdutores DC);
- Até 384 entradas digitais;
- Até 256 grandezas binárias obtidas de mensagens GOOSE segundo IEC 61850;
- Conversores analógico-digitais de 16 bits;
- Taxa de amostragem de 256 pontos-por-ciclo;
- Gravação de registros de forma de onda com 256, 128 ou 64 pontos-por-ciclo;
- Registros de longa duração contínua e por *trigger*;
- Aquisição sincronizada à referência externa de tempo padrão IRIG-B;
- Medição e registro de harmônicas até 50ª ordem;
- Sinalização de falha do equipamento.

No formato digital existem diversas maneiras de gravar informações e diferentes fabricantes de equipamentos tendem a utilizar diferentes técnicas. Porém isto dificulta o acesso e manipulação destas informações pelos usuários. Para facilitar a troca de informações dos registros e compatibilidade entre fabricantes o ONS adota o padrão IEEE COMTRADE para padronizar os registros dos RDPs instalados no sistema elétrico brasileiro (ONS, 2009).

O padrão COMTRADE, determina que as informações dos RDPs sejam divididas e gravadas em quatro arquivos de dados. Os quatro arquivos devem possuir o mesmo nome apenas diferindo na extensão, a qual indica o tipo de conteúdo do arquivo. Os arquivos com suas extensões são os seguintes (IEEE STD., 1999):

- Arquivo de cabeçalho (xxxxxxx.HDR) – é um arquivo de texto no formato ASCII. As informações contidas neste arquivo podem ser impressas e manipuladas diretamente pelo usuário que pode entender melhor as condições apresentadas. Não há um padrão a ser seguido, o IEEE apenas sugere alguns tipos de informações possíveis para serem descritas em um arquivo de cabeçalho, as quais irão auxiliar na interpretação dos dados: descrição do sistema de energia, nome da estação, identificação da linha,

transformador, reator, capacitor, ou disjuntor que é monitorado por cada canal, tensão nominal de enrolamento de transformadores, especialmente a potência e a corrente, a sequência de fase de entrada dentre outras informações (SANTOS, 2011);

- Arquivo de configuração (xxxxxxx.CFG) – é um arquivo de texto no formato ASCII que é lido por softwares especializados, por isso, é escrito em formato específico. O arquivo é dividido em linhas e as linhas em campos. Vírgulas são utilizadas como delimitador de campo, mesmo que o respectivo dado não seja especificado permitindo que o comprimento de cada campo seja variável. A informação em cada linha do arquivo deve ser listada na ordem exata requerida. Qualquer desvio do padrão estipulado anula todo o conjunto de arquivos. Contém as informações necessárias para interpretação do arquivo de dados (.DAT) e por isso não é opcional. As seguintes informações devem estar contidas no arquivo de configuração (IEEE STD., 1999):
  - Nome da estação, identificação do dispositivo de monitoração, ano de revisão do padrão COMTRADE;
  - Número e tipos dos canais;
  - Nome dos canais, unidades, a fatores de conversão;
  - Frequência da linha;
  - Taxa de amostragem;
  - Data e tempo do primeiro dado;
  - Data e tempo do ponto de acionamento da falta (*trigger*);
  - Tipo do arquivo de dados;
  - Fator de multiplicação da estampa de tempo.

A Figura 3 mostra um exemplo de arquivo de configuração, onde pode ser visto na primeira linha a identificação da subestação, do dispositivo de monitoração e o ano do padrão COMTRADE. A segunda linha especifica nove canais de entrada sendo todos analógicos, e nas linhas seguintes estão os nomes dos canais com suas unidades e fatores de conversão. Na sequência é especificada a frequência, a taxa de amostragem, data do primeiro dado e do ponto de *trigger*, tipo do arquivo e fator de multiplicação da estampa de tempo.

```

SE,RDP,1999
9,9A,0D
1,VA,,,V,17.44,0,0,-32768,32767,1,1,S
2,VB,,,V,17.44,0,0,-32768,32767,1,1,S
3,VC,,,V,17.44,0,0,-32768,32767,1,1,S
4,Reator_IA,,,A,0.221,0,0,-32768,32767,1,1,S
5,Reator_IB,,,A,0.221,0,0,-32768,32767,1,1,S
6,Reator_IN,,,A,0.05524,0,0,-32768,32767,1,1,S
7,LT_Ia,A,,,A,0.023187,-1.28851,0,-32767,32767,1200,5,S
8,LT_Ib,B,,,A,0.0637747,-145.13,0,-32767,32767,1200,5,S
9,LT_In,N,,,A,0.0864938,227.923,0,-32767,32767,1200,5,S
60
1
1440,1968
21/02/2007,22:35:56.895000
21/02/2007,22:35:57.146674
ASCII
1

```

**Figura 3: Exemplos de registro de oscilografia: arquivo de configuração (.cfg)**  
**Fonte: Autoria própria.**

- Arquivo de dados (xxxxxxx.DAT) – contém o número da amostra, a estampa de tempo e o valor de cada amostra dos canais de entrada do registro gravado. Os dados são dispostos conforme descreve o arquivo de configuração que também especifica os fatores de conversão para converter os valores apresentados em dados concretos, pois os números armazenados representam apenas uma escala dos valores reais. Além dos dados das entradas analógicas, pode-se registrar entradas digitais. Nesse caso, o estado da entrada é associado a níveis lógicos (SANTOS, 2011).

O arquivo de dados pode ser escrito em formato ASCII ou em formato binário e isto é especificado em um dos campos do arquivo de configuração. Para o formato ASCII o delimitador de campos é a vírgula enquanto em arquivos binários usa-se o tamanho de cada informação como delimitador.

No formato ASCII, o arquivo é dividido em linhas e colunas. O número de linhas varia de acordo com o tamanho da amostra e afeta diretamente o tamanho total do arquivo. O número de colunas depende da quantidade de canais analisados e também afeta o tamanho total do arquivo. A seguir é mostrada a sequência de informações necessárias (IEEE STD., 1999):

- A primeira coluna contém o número da amostra;
- A segunda coluna é a estampa de tempo;
- A terceira coluna representa o conjunto de dados dos canais analógicos;
- As próximas colunas representam o conjunto de dados dos canais digitais.

Não pode haver quebra de linha entre os dados referentes ao mesmo tempo de amostragem. O arquivo deve terminar com um caractere ASCII de EOF, End Of File, referente ao término de arquivo.

A Figura 4 mostra o conteúdo do arquivo .DAT para o mesmo registro da Figura 3. Verifica-se que o arquivo é composto por onze colunas, separadas por vírgulas, conforme o formato ASCII especificado no arquivo de configuração. A primeira coluna especifica o número da amostra, a segunda a estampa de tempo e as nove seguintes o valor da amostra para o canal correspondente. Cada linha corresponde a uma nova amostra para os mesmos canais.

```
0000000001,0000000000,006343,004197,-11227,000216,-00234,000026,000055,002275,-02635
0000000002,0000000694,004218,006300,-11082,000259,-00191,000025,000055,002275,-02635
0000000003,0000001388,001707,008611,-10502,000252,-00155,000016,000055,002275,-02635
0000000004,0000002083,-01557,010612,-08871,000264,-00084,000024,000055,002275,-02635
0000000005,0000002777,-04251,011157,-06455,000247,-00027,000019,000055,002275,-02635
0000000006,0000003472,-06356,011005,-03978,000206,000051,000023,000055,002275,-02635
0000000007,0000004166,-08615,010421,-01432,000151,000110,000019,000055,002275,-02635
0000000008,0000004861,-10590,008652,001612,000092,000167,000024,000055,002275,-02635
0000000009,0000005555,-11324,006349,004403,000035,000222,000024,000055,002275,-02635
0000000010,0000006250,-11339,004231,006469,-00039,000255,000027,000055,002275,-02635
0000000011,0000006944,-10675,001713,008579,-00098,000268,000019,000055,002275,-02635
0000000012,0000007638,-08772,-01462,010547,-00166,000257,000029,000055,002275,-02635
0000000013,0000008333,-06353,-04197,011230,-00210,000239,000022,000055,002275,-02635
0000000014,0000009027,-04229,-06294,011084,-00242,000201,000019,000055,002275,-02635
0000000015,0000009722,-01707,-08608,010487,-00260,000152,000027,000055,002275,-02635
0000000016,0000010416,001551,-10610,008867,-00253,000101,000029,000055,002275,-02635
0000000017,0000011111,004244,-11159,006467,-00230,000025,000025,000055,002275,-02635
0000000018,0000011805,006348,-11007,003985,-00174,-00030,000024,000055,002275,-02635
```

**Figura 4: Exemplos de registro de oscilografia: arquivo de dados (.dat)**

Fonte: Autoria própria.

- Arquivo de informações (xxxxxxx.INF) - é um arquivo opcional em formato ASCII que contém informações extras que a fonte de dados deseja tornar disponível para os usuários. Este arquivo também pode conter informações privadas, só interpretáveis pelo fabricante (IEEE STD., 1999).

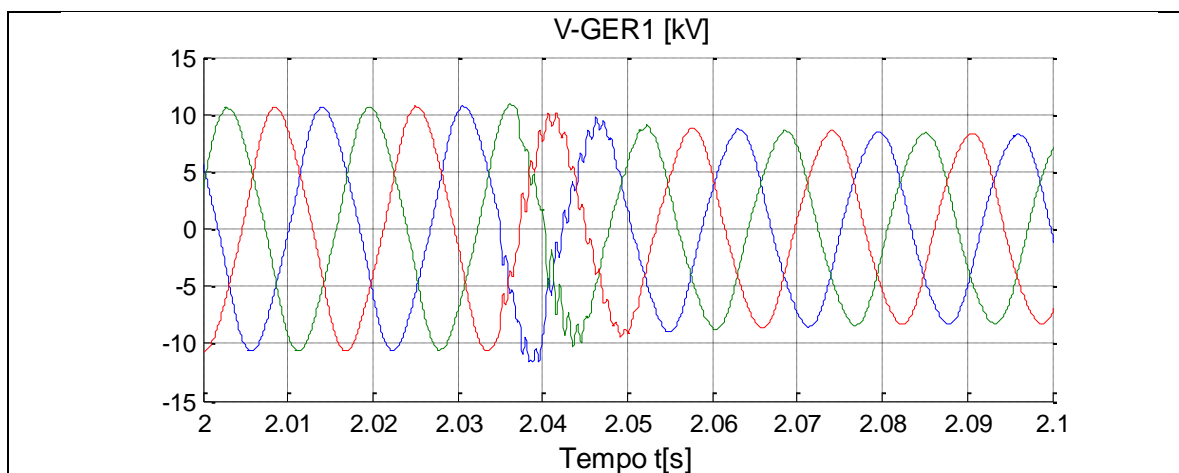
Além das informações contidas nos arquivos COMTRADE, muitos fabricantes de equipamentos implementaram uma funcionalidade a mais, o registro de longa duração ou simplesmente registro fasorial. Esse registro apresenta uma duração da ordem de minutos e registra apenas informações de módulo e ângulo das tensões e correntes amostradas em uma taxa menor. Essas informações são úteis para análises de fluxo de potência e oscilações de baixa frequência, como as de origem mecânica (MORETO, 2011).

Como esse tipo de registro não estava definido no padrão COMTRADE definido na norma IEEE C37.111-1999, cada fabricante de RDP criou seu próprio padrão, acrescentando arquivos ao registro. A nova revisão do padrão IEEE C37.111-2013 define um esquema para acrescentar as informações desse registro no arquivo de dados (.DAT) adicionando dois canais analógicos, um para o módulo e outro para a fase, de cada sinal que se deseja criar um registro fasorial (IEEE STD, 2013).

O conteúdo dos registros no padrão COMTRADE pode assim ser lido por softwares especializados, que utilizam as informações do arquivo de configuração, para interpretar os arquivos de dados e construir gráficos. Assim a informação torna-se amigável aos olhos de um analista, que consegue interpretar as oscilações registradas e determinar uma causa para a mesma.

Ao transformar os dados dos registros de oscilografia para informações, podemos classifica-las em três tipos principais (MORETO e ROLIM, 2010):

- Registro de curta duração – consiste no gráfico produzido através dos dados dos canais analógicos de tensão e corrente monitorados, com uma taxa de aquisição alta, da ordem de 256 pontos-por-ciclo (REASON, 2010). Em função da alta taxa de aquisição são armazenados apenas alguns segundos. Este registro também é chamado de registro de forma de onda, pois permite visualizar a forma de onda do canal monitorada. A Figura 5 mostra um exemplo deste tipo de informação para três canais de tensão monitorados, sendo um canal para cada fase.

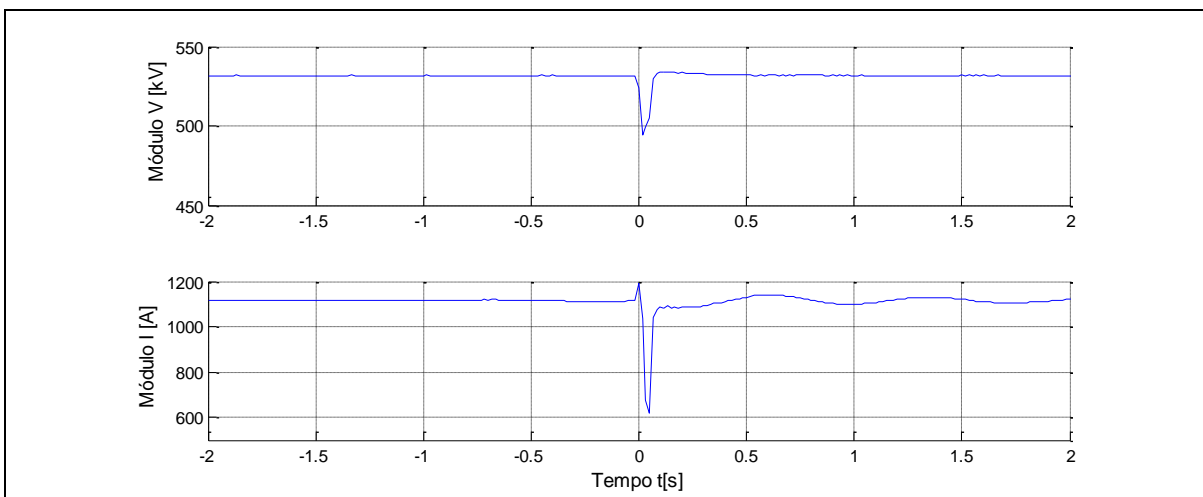


**Figura 5: Exemplos de registro de curta duração.**

**Fonte: Autoria própria.**



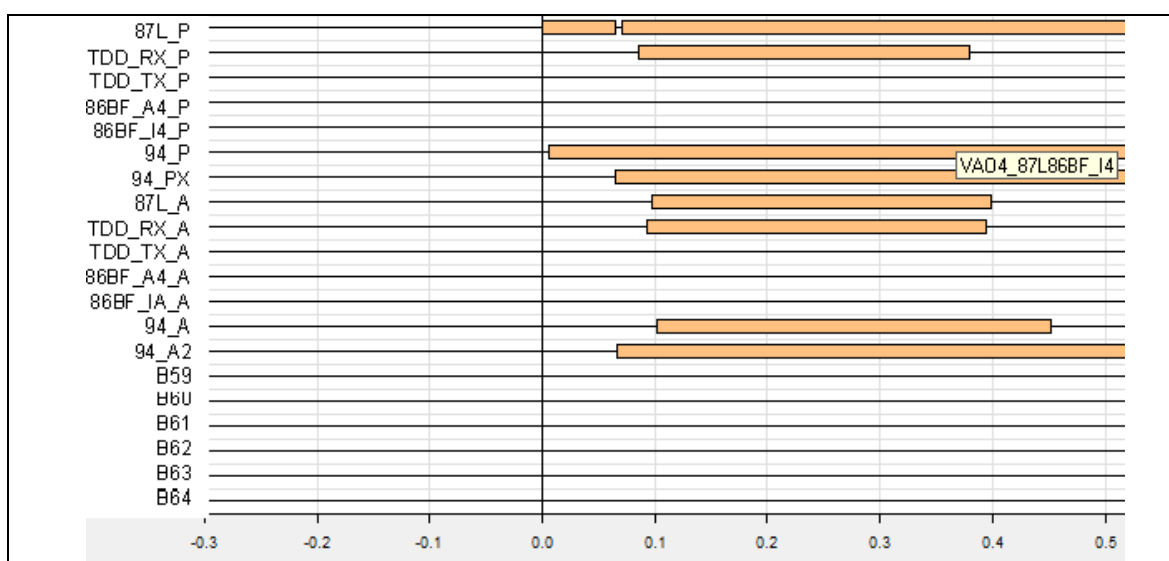
- Registro de longa duração – consiste no registro dos fasores de um canal, ou seja, apenas o módulo e o ângulo do sinal monitorado são registrados, com uma taxa de aquisição bem menor que o registro de forma de onda, permitindo-se assim registrar até alguns minutos de informações. A Figura 6 mostra um exemplo de registro fasorial, como também é conhecido.



**Figura 6: Exemplos de registro de longa duração.**

**Fonte: Autoria própria.**

- Sequência de eventos – O monitoramento dos canais digitais permite criar uma sequência cronológica dos eventos ocorridos, como atuação de proteção, abertura de disjuntor, atuação de proteções secundárias ou de retaguarda entre outros. A Figura 7 mostra um exemplo de sequência de eventos em um registro de oscilografia.



**Figura 7: Exemplos de registro de sequência de eventos.**

**Fonte: Autoria própria.**

As leituras dos registros a que se referem as Figura 5 e Figura 6 foram realizadas em rotina desenvolvida no MATLAB<sup>®1</sup> e para a Figura 7 foi realizada no software SIGRA 4 – *Fault Record Evaluation*<sup>®2</sup>.

## 2.2 APLICAÇÕES PARA A OSCILOGRAFIA

A análise das ocorrências e perturbações no SIN implica diretamente na segurança operacional do sistema e está relacionada com a qualidade dos serviços de energia elétrica. Por qualidade dos serviços entenda-se continuidade, confiabilidade, tempo restabelecimento em casos de blecaute e outros. Essa responsabilidade é dos agentes de operação do setor elétrico e do ONS, de acordo com o definido pela Resolução Normativa Aneel nº 115, de 29 de novembro de 2004 (COSTA, 2010).

As análises de ocorrências e perturbações proveem subsídios fundamentais para identificar as causas e consequências, para avaliar e especificar equipamentos de proteção, como relés e disjuntores, para o diagnóstico de equipamentos e classificação dos distúrbios, entre outras aplicações. Desta forma, medidas corretivas e preventivas podem ser tomadas, resultando em melhorias no desempenho do sistema elétrico e da qualidade dos serviços públicos de energia elétrica (PEREZ e RINCON, 2012).

As oscilografias constituem o principal insumo para as análises de ocorrências e perturbações, sendo o seu registro considerado pelo ONS como documento oficial para o Relatório de Análise de Perturbação (RAP) (ONS, 2009). Através da análise de oscilografias é possível extrair informações úteis para diversas aplicações. Os tópicos seguintes fazem uma breve descrição sobre alguns campos de pesquisa aonde as oscilografias vêm sendo empregadas.

---

<sup>1</sup> MATLAB<sup>®</sup>: ambiente de desenvolvimento de algoritmos e análise de dados da MathWorks Inc.

<sup>2</sup> SIGRA 4 – *Fault Record Evaluation*<sup>®</sup>: software de visualização de oscilografias da Siemens AG.

### 2.2.1 Análise da qualidade de energia

A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) define através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) os critérios de qualidade mínimos que os consumidores de energia elétrica têm direito. Especificamente no módulo 8 do PRODIST estão caracterizados os fenômenos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE), os critérios de amostragem, os valores de referência e os procedimentos relativos à qualidade do produto (ANEEL, 2008).

Conforme o PRODIST são considerados aspectos da QEE em regime permanente ou transitório:

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Harmônicos;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Variação de frequência.

As informações de todos os fenômenos acima citados podem ser extraídas de uma oscilografia de curta duração. Fica assim explícito a aplicação das oscilografias na análise da QEE, seja por parte dos consumidores ou dos fornecedores de energia. Kezunovic (2001) propôs a viabilidade da automatização da análise de distúrbios de qualidade de energia com uso de técnicas de processamento de sinais aliadas a ferramentas de inteligência artificial. A extração de propriedades estatísticas dos sinais com uso de transformada de Fourier permitiria avaliar os parâmetros de qualidade de energia (KEZUNOVIC e LIAO, 2001). Costa (2011) apresentou uma ferramenta para baseada em *wavelet* para detecção de distúrbios da qualidade de energia. As características da perturbação podem ser identificadas por meio dos seus coeficientes de *wavelet* (COSTA et al., 2011).

### 2.2.2 Diagnóstico de equipamentos

Monitorar o funcionamento de dispositivos de manobra, como disjuntores, ou de equipamentos como transformadores de instrumentos (transformador de corrente, transformador de potencial, para-raios) é uma constante necessidade no departamento de manutenção dos agentes do setor elétrico.

Através da análise de uma oscilografia é possível, por exemplo, determinar se o tempo de abertura de um disjuntor encontra-se dentro do especificado pelo fabricante. Este tipo de equipamento mecânico de manobra sofre desgaste natural de seus componentes e definir o momento certo para realizar a manutenção preventiva é crucial para o sistema elétrico. Também é possível determinar tempos de restabelecimento de um para-raios após a ocorrência de uma descarga atmosférica e verificar se o mesmo não apresenta corrente de fuga acima da nominal. Diversas outras características de equipamentos podem ser identificadas em uma oscilografia, como nível de saturação em transformadores de corrente, corrente de *inrush* de transformadores, reatores e banco de capacitores (MORETO e ROLIM, 2010).

Um sistema de monitoramento de disjuntor, para auxiliar na manutenção preditiva, foi proposto por Silva (2005). A transformada de Fourier foi usada para acompanhar a componente de frequência fundamental das correntes e tensões e a transformada *wavelet* para detectar o instante de interrupção da corrente e assim determinar o tempo de abertura do disjuntor (SILVA, 2005).

Lachman (2007) propôs e implementou uma rotina computacional aplicando filtro de Fourier sobre registros de oscilografia para monitorar o funcionamento de Transformadores de Potencial Capacitivos (TPCs) instalados em subestações em operação (LACHMAN, 2007).

### 2.2.3 Diagnóstico dos sistemas de proteção

Os requisitos básicos para um sistema de proteção são (ANDERSON, 1998):

- Confiabilidade - habilidade da proteção em atuar corretamente quando necessário e evitar atuações desnecessárias;
- Seletividade - capacidade da proteção em selecionar e interromper apenas os disjuntores mais próximos da falta;
- Velocidade - rapidez com que a proteção localiza e elimina um defeito;
- Sensibilidade - capacidade da proteção em atuar sob mínimas condições de falta dentro da sua zona de proteção, sem perder a confiabilidade.

Essas características dos sistemas de proteção podem ser monitoradas através das oscilografias. A velocidade pode ser verificada pelos tempos de atuação. A seletividade pela eliminação do defeito interrompendo somente os circuitos envolvidos na falta. A sensibilidade pela verificação dos limiares de atuação pré-ajustados nos relés de proteção e a confiabilidade pela verificação da real necessidade da atuação quando esta ocorrer (CARDOSO, 2013).

Lens (2009) desenvolveu um programa computacional que relaciona os dados extraídos das oscilografias com as sequencias de eventos dos sistemas de supervisão. A ferramenta proposta avalia o desempenho dos relés de proteção após uma ocorrência apoiando o especialista em análise de proteção (LENZ, 2009).

### 2.2.4 Localização de faltas

Os sistemas elétricos devem oferecer alto grau de continuidade no fornecimento de energia. Porém, interrupções nos serviços de energia elétrica podem ser provocadas pela ocorrência de diferentes tipos de fenômenos eletromagnéticos que podem afetar distintas classes de consumidores. Perturbações podem ocorrer em diversos componentes de um SEP, dentre os quais se destacam as Linhas de Transmissão (LTs) como o elemento mais susceptível, especialmente devido as suas dimensões físicas, complexidade funcional e ao ambiente em que se

encontram, apresentando uma maior dificuldade para manutenção e monitoramento (SILVA, OLESKOVICZ e COURY, 2005).

As decisões mais importantes sobre a operação do SEP são tomadas nos Centros de Operação dos Sistemas (COS), onde em tempo real informações sobre o estado dos equipamentos são recebidas por operadores humanos. Estes são o elo final de uma prolongada cadeia de operação e têm como função realizar rápidas análises de ocorrências, buscando minimizar o tempo de restabelecimento das condições normais dos serviços de energia elétrica. Neste contexto ferramentas que indiquem a localização, mesmo que aproximada, de uma falta em uma LT, aceleram os procedimentos de manutenção. Equipes de campo especializadas podem ser acionadas e encaminhadas diretamente ao local da perturbação no sistema, reduzindo o tempo de deslocamento (FARIA et al., 2009).

Os dados registrados pelos RDPs, aliados ao conhecimento de características de uma LT, permitem a implementação de técnicas para cálculo e determinação da provável localização da falta. O trabalho de Silva (2005) apresentou uma aplicação da transformada *wavelet* para analisar os transitórios de alta frequência em um sistema de transmissão gerados por uma situação de falta, tendo como principal objetivo, a determinação do ponto de ocorrência da mesma (SILVA, OLESKOVICZ e COURY, 2005).

Os mais modernos RDPs já têm disponíveis para o usuário funções de localização de falta baseadas na teoria de ondas viajantes. Em função do tempo de propagação do sinal entre o ponto de falta e os terminais da linha, a localização da falta é estimada. Este é o caso do RPD-310 da Reason Tecnologia S.A. conforme descreve seu manual no tópico sobre suas características:

“Preparado para receber o módulo de localização de faltas por ondas viajantes. Tecnologia que permite a localização de faltas com a precisão de 300 metros em linhas de transmissão / distribuição de energia, independente do comprimento da linha” (REASON, 2010).

#### 2.2.5 Detecção e classificação de faltas

Dentre todas as possíveis aplicações para as oscilografias, uma delas se destaca. É a busca por determinar a causa ou tipo de falta que ocorreu no SEP, ou

simplesmente a classificação da falta. A principal motivação para esta aplicação se deve às características dos SEP, que estão sujeitos a uma grande gama de defeitos de difícil determinação pelas equipes de operação em tempo real dos COS. Assim quando perturbações ocorrem e causam desligamento de funções do sistema, como geradores ou LTs, e suas causas não são facilmente detectadas, cabe aos analistas de oscilografia indicar ao menos uma provável origem do defeito, para que as equipes de campo tenham um ponto de partida no processo de manutenção.

Esse processo pós-operação de análise de oscilografias, geralmente dispõem de uma rede de coleta de oscilografias, que pode acessar todos os RDPs de um agente do SIN, conforme mostrado na Figura 1 (MORETO e ROLIM, 2010). Esse processo centralizado de análise de oscilografias pode ser dividido em duas etapas, ambas com sua importância, sendo elas explicitadas nos dois tópicos seguintes.

#### 2.2.5.1 Detecção de faltas

A lógica de funcionamento dos RDPs consiste no ajuste de condições de *trigger*. Estas condições quando atendidas dão início ao processo de gravação de um registro de oscilografia. Os *triggers* nada mais são do que limiares fixos para os canais analógicos monitorados e/ou mudança de estado para os canais digitais. Por exemplo, pode-se configurar que se o valor de um canal de tensão chegar a 0,9 pu dispare o processo de gravação. Em um canal digital o *trigger* pode representar a atuação de uma proteção. Essa lógica é muito eficiente e permite uma ótima correlação entre os dados de diferentes RDPs, por exemplo, instalados nos dois extremos de uma LT. (MORETO e ROLIM, 2010).

O inconveniente é que uma única perturbação pode gerar o disparo de diversos RDPs no SEP, gerando registros em todos eles. Muitas ocorrências que estão relacionadas apenas com fenômenos de QEE podem atingir os limiares de ajuste de *trigger* e produzir registros de oscilografia não relacionados a uma falta. Também ocorre disparo de *trigger* devidos a manobras no SEP ou ensaios em equipamentos durante manutenções preventivas.

A etapa de análise de oscilografias com objetivo de detecção de faltas consiste em uma análise menos aprofundada dos registros, que tem por objetivo

principal fazer uma triagem dos registros. Após a triagem dois grupos de registros são separados, um dos que não representam faltas reais no sistema e outro que contem informações de faltas no sistema. Assim os registros relacionados a perturbações no SEP serão objeto de estudo mais minucioso enquanto os demais podem ser arquivados. O trabalho de Moreto (2011) buscou desenvolver uma metodologia capaz de arquivar automaticamente os registros de ocorrências que não necessitam de análise detalhada (MORETO, 2011). A Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) mostrou sua contribuição com o desenvolvimento de um *software* responsável pela triagem dos registros oscilográficos de seu sistema de transmissão de energia (BRITO, SOUZA e COSTA, 2010).

#### 2.2.5.2 Classificação das faltas

Na etapa posterior à triagem dos registros, busca-se fazer a classificação das faltas. Esta análise tipicamente faz uso dos registros de curta-duração, ou registros de forma de onda, que possuem alta taxa de amostragem. Faz-se necessário recorrer a técnicas de processamento de sinais mais avançadas para auxiliar nessa tarefa, com o objetivo de automatizar o diagnóstico sobre os tipos de distúrbio presentes nos sinais registrados. A transformada *wavelet* constitui-se em uma ferramenta matemática bastante eficaz na análise de sinais de tensão ou corrente, obtidos durante a ocorrência de distúrbios na rede elétrica (CÂNDIDO, 2008). Também se pode estimar o tempo/instantes das mudanças nos parâmetros do sinal registrado, segmentando-o em pré-falta, durante a condição de falta e pós-falta. Após a segmentação do sinal em seções, o processamento e análise do sinal podem ser realizados nestes segmentos (UKIL e ZIVANOVIC, 2007).

A classificação pode indicar o tipo do defeito a que o SEP foi submetido. Para Meneses e Rocha (2009) as faltas em LTs podem ser classificadas como: curto-circuito fase-fase, trifásico ou fase-terra, rompimento de condutor, queimada, descarga atmosférica e outros (MENESES e ROCHA, 2009). O trabalho de Costa (2010) propôs um método de diagnóstico de distúrbios transitórios baseado na análise em tempo real da energia dos coeficientes *wavelets* das tensões e correntes em sistemas elétricos de transmissão de energia. O método é capaz de detectar os principais distúrbios com transitórios, tais como faltas, faltas evolutivas,



afundamentos de tensão e transitórios devido às manobras de chaveamento em sistemas (COSTA, 2010). Já o trabalho de Moreto (2011) apresentou uma metodologia baseada em filtros de Kalman para análise automática de perturbações em unidades de geração de energia com objetivo de fornecer uma estimativa da causa das faltas.

## 2.3 FERRAMENTAS UTILIZADAS NA EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES

A extração das informações dos registros de oscilografia consiste em um problema típico de Processamento Digital de Sinais (PDS) e como tal é tratado por meio de ferramentas matemáticas. Cada ferramenta é mais adequada a um tipo específico de sinal, portanto o conhecimento dos dados se faz necessário antes da escolha por qual ferramenta utilizar, bem como a definição de quais as informações a serem extraídas dos dados. A evolução e adaptação de métodos matemáticos aplicados a sinais contínuos no tempo para representar sinais amostrados tem ocorrido de maneira rápida e diversas ferramentas surgiram nas ultimas décadas. Para citar algumas: filtros digitais, Transformada Discreta Fourier (DFT), Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a mais recente Transformada *Wavelet* Discreta (DWT) (WEEKS, 2012).

Diversas publicações tem mostrado a aplicação das técnicas de PDS nas análises de oscilografias. O Quadro 1 relaciona algumas publicações de acordo com a ferramenta utilizada e o objetivo da aplicação.

<b>Aplicação</b>	<b>Ferramenta utilizada</b>	<b>Referência</b>
Identificação e classificação de faltas no sistema de transmissão da Chesf.	Transformada de <i>wavelet</i> discreta.	(BRITO, SOUZA e COSTA, 2010)
Deteção de distúrbios de qualidade de energia.	Energia dos coeficientes <i>wavelets</i> .	(COSTA et al., 2011)
Diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios no sistema de transmissão.	Transformada <i>wavelet</i> .	(COSTA, 2010)
Classificação de distúrbios na rede elétrica de transmissão de energia.	<i>Wavelets</i> e redes neurais.	(CÂNDIDO, 2008)
Pré-análise e triagem dos registros de oscilografias repassados ao ONS pelos agentes do sistema de transmissão de energia elétrica.	Não informada.	(GIOVANINI et al., 2008)
Análise automática de distúrbios de qualidade de energia elétrica.	Transformada de Fourier.	(KEZUNOVIC e LIAO, 2001)
Monitoração e avaliação do estado de transformadores de potencial capacitivo.	Transformada rápida de Fourier.	(LACHMAN, 2007)
Avaliação do desempenho de relés digitais de proteção de unidades geradoras.	Não informada.	(LENZ, 2009)
Identificação e classificação de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica.	Transformada <i>wavelet</i> e rede neural probabilística.	(MENESES e ROCHA, 2009)
Análise automática de perturbações em unidades geradoras para arquivar automaticamente registros que não necessitem de análise detalhada.	Sistemas especialistas e filtro de Kalman.	(MORETO, 2011)
Monitoramento e estimativa dos tempos de operação de disjuntores em subestações de transmissão de energia elétrica.	Transformada de Fourier e transformada <i>wavelet</i> .	(SILVA, 2005)
Localização de faltas em linhas de transmissão.	Transformada <i>wavelet</i> .	(SILVA, OLESKOVICZ e COURY, 2005)
Deteção dos instantes de mudanças abruptas nos registros de oscilografias da rede de energia da África do Sul.	Filtros de Kalman.	(UKIL e ZIVANOVIC, 2007)

**Quadro 1: Publicações: objetivo da aplicação versus ferramenta utilizada.**

### 3. FUNDAMENTOS DA TRANSFORMADA WAVELET

#### 3.1 POR QUE WAVELETS

O emprego da matemática para descrever e explicar fenômenos físicos não é nenhuma novidade. No passado diversos físicos tiveram que desenvolver teorias matemáticas para representar fenômenos por eles estudados. No século XVII o físico inglês Isaac Newton, sentiu necessidade de ferramentas matemáticas específicas para exprimir relações entre grandezas mecânicas. Ao estudar o que chamava de “fluxões das variáveis” Newton definiu o conceito de derivadas e integrais, a base do calculo infinitesimal amplamente utilizado atualmente. (CARVALHO e D'OTAVIANO, 2006).

Nos dias atuais a matemática não só descreve os fenômenos físicos, mas possibilita a solução de problemas do mundo real. Através do processamento computacional solucionam-se problemas que, em alguns casos, necessitariam anos para ser solucionados de maneira analítica, além disso, é possível obter soluções para problemas que sequer possuem solução analítica. E quando se trata de problemas do mundo real recai-se diretamente sobre o Processamento Digital de Sinais (PDS), área da engenharia que têm evoluído com métodos cada vez mais complexos e sempre embasados em teorias oriundas da matemática (WEEKS, 2012).

No século XIX o matemático e físico francês Jean Baptiste Joseph Fourier publicou seu estudo sobre ondas e calor no qual propõem que um sinal periódico qualquer pode ser representado por uma única expressão analítica. Ele acabava de criar uma das ferramentas mais utilizadas na análise de sinais e que leva seu nome, a “Análise de Fourier” ou no método matemático Transformada de Fourier (FT – *Fourier Transform*) (OLIVEIRA, 2007). Aplicando-se a FT a um sinal óptico, por exemplo, obtêm-se a sua decomposição nas cores fundamentais do arco íris, onde cada cor corresponde a uma frequência. Se uma das frequências possuir maior amplitude que as demais o feixe de luz terá a cor correspondente a esta frequência predominante. Este é um exemplo básico da análise de sinais que pôde ser

desenvolvida a partir do método matemático proposto por Fourier e que na matemática é representado pela integral da equação (1).

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

Onde:

$f(t)$  : sinal contínuo no tempo  $t$ ;

$\omega$ : frequência angular em rad/s;

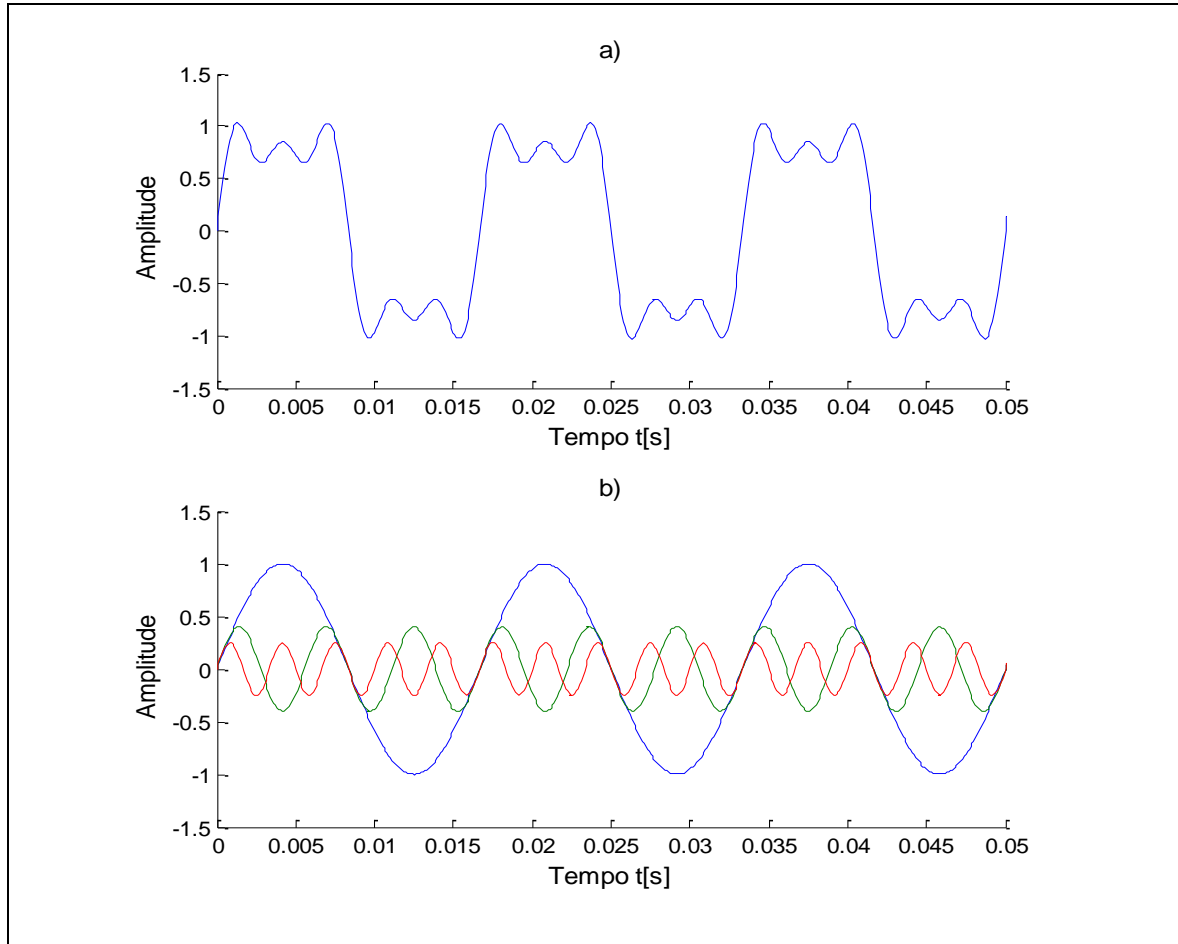
$F(\omega)$ : sinal contínuo na frequência  $\omega$ .

(1)

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

A FT tornou-se uma ferramenta amplamente utilizada em diferentes campos como óptica, física, telecomunicações, computação, eletrônica e elétrica. Essencialmente ela consiste em uma transformação linear que troca a base do tempo para a base da frequência de um sinal. Isso permite olhar, analisar e manipular informações de frequência, o que em determinadas aplicações é mais adequado do que o tempo (MIX e OLEJNICZAK, 2003).

Ao aplicar a FT em um sinal contínuo no tempo, é possível visualizar as senoides fundamentais que formam este sinal. A Figura 8 mostra um exemplo de sinal que é composto por várias senoides de diferentes frequências e amplitudes.



**Figura 8: a) Sinal contínuo no tempo. b) Decomposição feita pela FT em sinais de frequências fundamentais.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Um sistema de som permite alterar amplitudes de bandas de frequências específicas em uma música, realizando sua mixagem, eliminando ruídos indesejados ou criando uma nova versão da música original. Esse tipo de aplicação pode ser feito em um arquivo de áudio digital com dados discretos, por exemplo, no formato mp3, utilizando a Transformada de Fourier Discreta (DFT – *Discrete Fourier Transform*) que pode ser expressa na forma da equação (2) (WEEKS, 2012).

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi nm/N}$$

Onde:

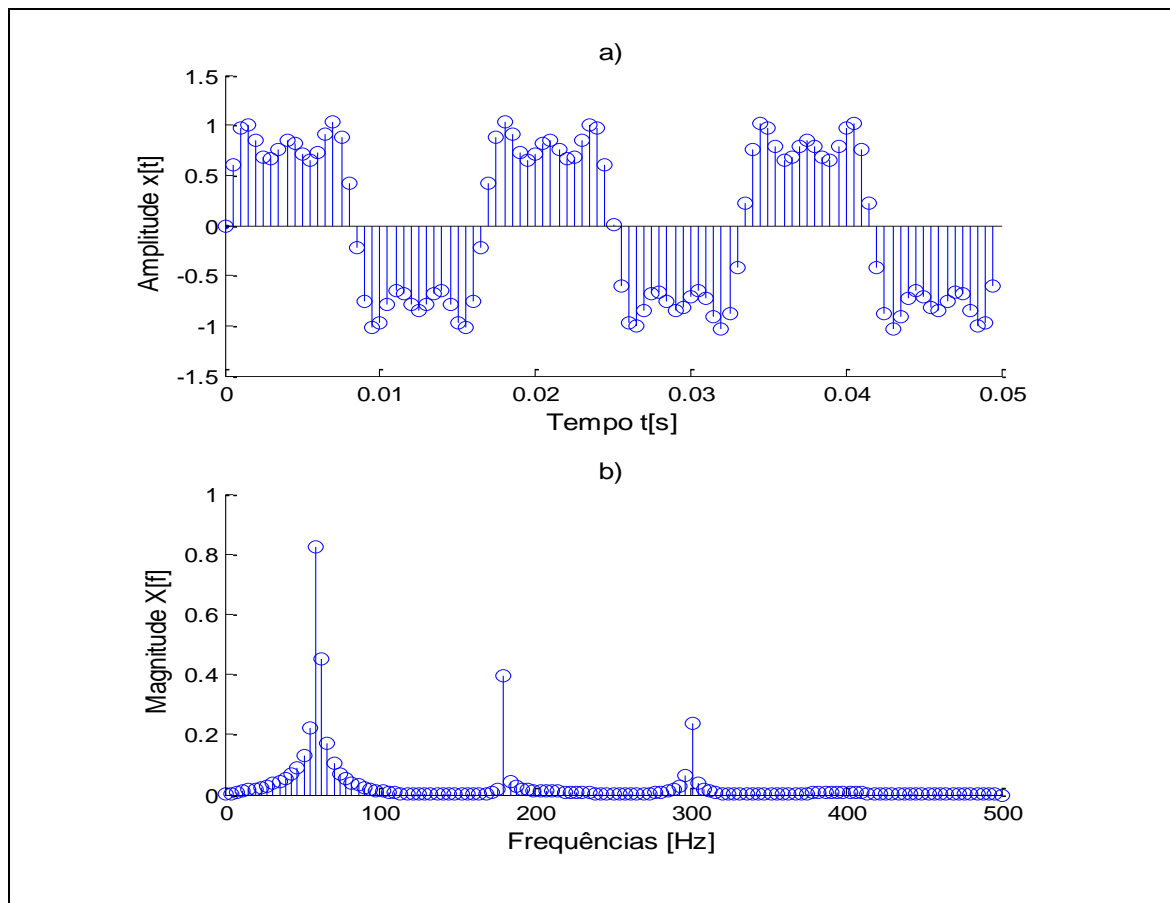
$x[n]$ : sinal discreto com  $(N - 1)$  amostras;

$X[m]$ : sinal discreto transformado onde  $m = 0, \dots, N - 1$ ;

**Fonte: (WEEKS, 2012)**

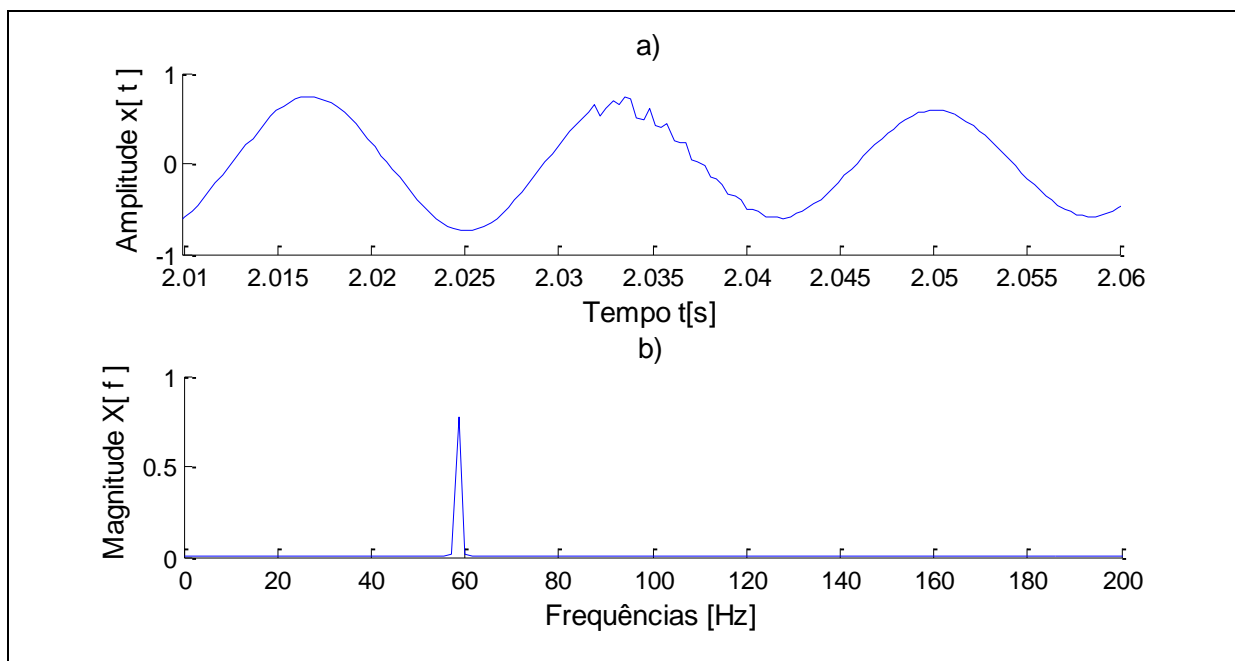
(2)

Este tipo de análise em sinais discretos é exemplificado na Figura 9 que, através da aplicação da DFT, mostra as frequências que compõem um sinal discreto no tempo.



**Figura 9: a) Sinal discreto no tempo. b) Magnitude dos fasores de frequências distintas que compõem o sinal discreto, obtidas a partir da DFT.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A FT mostra informações sobre quais frequências formam um sinal, representando uma média de todo o sinal desde seu início até seu final, ou seja, do tempo  $-\infty$  ao  $+\infty$  como pode ser visto na integral da equação (1). A contribuição de cada harmônica do sinal completo fica explícita. Porém a informação correspondente ao instante de tempo em que as frequências ocorrem é perdida. Isto fica mais evidente quando aplicamos a FT em um sinal não estacionário como o da Figura 10. Na Figura 10 b) vê-se apenas a informação das frequências que compõem o sinal da Figura 10 a) mas não o instante de tempo em que elas ocorrem.

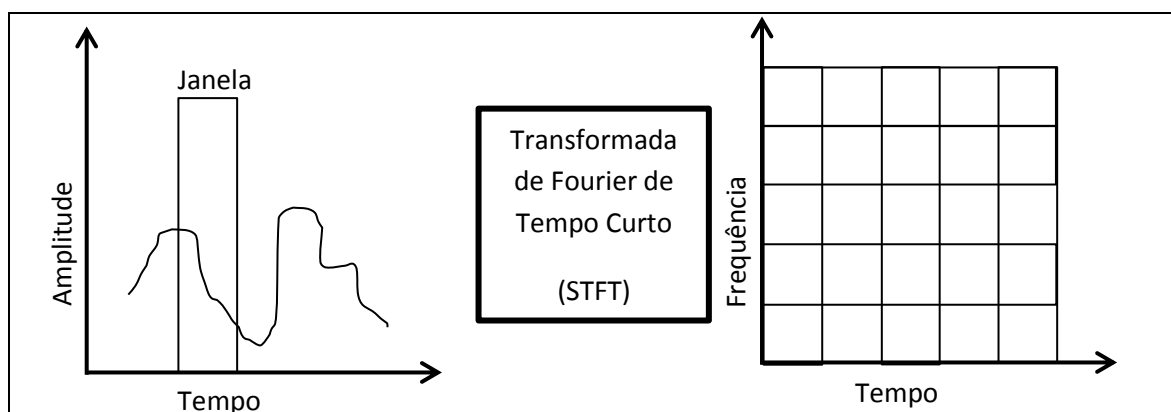


**Figura 10:** a) Sinal de registro de oscilografia. b) Frequências que compõem o sinal, obtidas a partir da FT.

Fonte: Autoria própria.

A grande desvantagem da FT para aplicação em análise de oscilografias é o fato de ela não ser capaz de fornecer informações sobre o tempo, apenas frequências. Sendo assim ela é útil para análise de sinais estacionários, ou seja, que apresentem um comportamento repetitivo ao longo tempo, como os sinais da Figura 8 e da Figura 9 (OLIVEIRA, 2007).

Para analisar sinais não estacionários Denis Gabor, em 1946, propôs uma adaptação da FT. Esta adaptação consiste em dividir, o sinal sob análise, em intervalos menores e aplicar a FT a cada intervalo ou “janela” de tempo do sinal original, definindo assim a Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT – *Short Time Fourier Transform*) como mostra a Figura 11.



**Figura 11:** Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT).

Fonte: Adaptado de (DELMONT, 2003).

Para cada janela da Figura 11 é aplicada a FT ao sinal e obtêm-se como resultado a informação das frequências que o compõem gerando o gráfico bidimensional tempo x frequência. A STFT consiste em uma transformada local, que analisa o sinal no tempo  $f(t)$  através de uma “janela”  $W(t)$ , centrada em um instante de tempo  $t$  e limitada há um tempo inicial e final. A representação matemática da STFT é dada pela equação (3) (OLIVEIRA, 2007).

$$STFT(w, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)W(t - \tau)e^{-j\omega t} dt$$

Onde:

$W(t - \tau)$ : função janela centrada em  $t$  e de largura  $\tau$ ;

$STFT(w, \tau)$ : sinal contínuo na frequência  $w$  para cada janela.

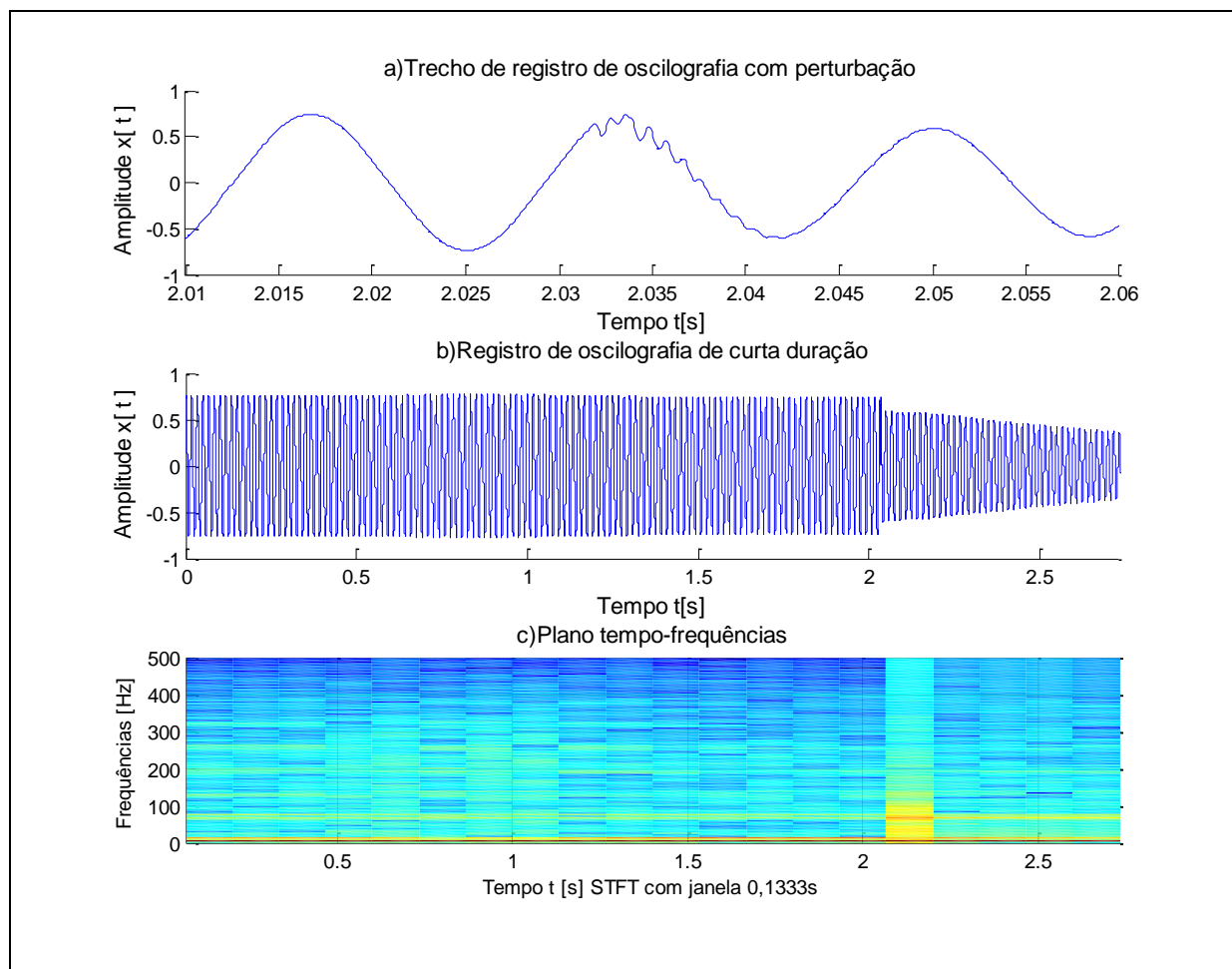
(3)

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

A Figura 12 c) mostra o plano tempo versus frequência, de um registro de oscilografia com perturbação, obtido pela STFT com uma largura de 0,1333 s para a janela de tempo. A Figura 12 a) mostra em detalhe a perturbação no sinal registrado que é mostrado na Figura 12 b). Analisando a Figura 12 c) é possível identificar que entre os instantes 2,1 s e 2,2 s surgem componentes de frequências maiores que não ocorrem no restante do sinal. Isso pode ser visto na Figura 12 c) através da cor, cores mais “quentes” representam maior amplitude das componentes de frequência. Através do detalhe da Figura 12 a) percebe-se que o intervalo mais exato da perturbação está entre 2,025 s e 2,045 s. Se a largura  $\tau$  da janela de tempo for reduzida poderá informar com mais precisão o instante da perturbação. Porém, há uma dificuldade na escolha da largura da janela, uma vez que, normalmente, não se conhece *a-priori* o tipo de perturbação que poderá incidir no sinal.

A STFT relaciona informações de frequências com o tempo, minimizando a deficiência da FT. Verifica-se que a STFT fornece mais informações, porém a resolução das informações sobre as frequências é a mesma em todo o intervalo de tempo analisado e determinada pela largura da janela escolhida para a STFT. (COSTA, 2010).





**Figura 12: a) Trecho de registro de oscilografia com perturbação. b) registro de oscilografia de curta duração. c) Plano tempo versus frequência, obtido pela STFT.**  
**Fonte: Autoria própria.**

O sinal analisado na Figura 12 é um sinal típico dos registros de oscilografia de sistemas elétricos. Sinais com características semelhantes também ocorrem em registros de sismógrafos, os quais foram estudados pelo geofísico Jean Morlet na década de oitenta, orientado por Alex Grossman (físico teórico) na França. Nestes sinais as componentes de frequências mudam rapidamente ao longo do tempo podendo surgir a qualquer momento. Nestes casos a STFT não é suficiente para extrair informações precisas dos sinais. Nos intervalos que contém frequências mais altas uma maior aproximação é conveniente, necessitando-se variar o tamanho da janela para determinar com exatidão o tempo ou a frequência. Assim Morlet propôs uma nova transformada, denominada Transformada *Wavelet* (WT – *Wavelet Transform*), na qual a largura da janela é variável, permitindo que altas frequências possam ser localizadas com uma maior precisão (DELMONT, 2003).

Oliveira (2007) exemplifica com a comparação: “a análise através da WT permite visualizar tanto a floresta como as árvores”, o que pode ser percebido na Figura 13. Na Figura 13 b) vê-se que a janela de tempo que localiza as frequências mais altas é menor do que na Figura 13 a), ou seja, a resolução para as frequências mais altas é melhor na WT do que na STFT.

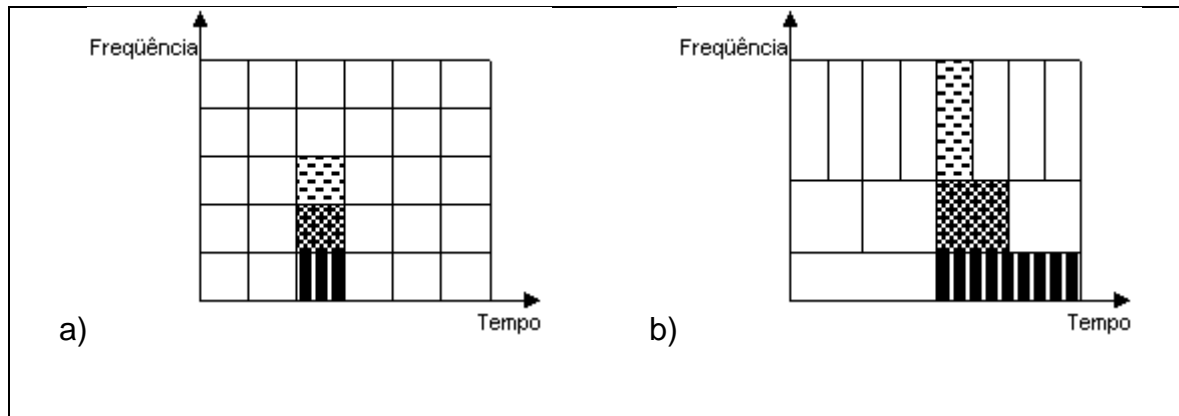


Figura 13: Resolução no plano tempo-frequência a) Obtido pela STFT b) Obtido pela WT. Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2007).

### 3.2 A TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA - CWT

Matematicamente a Transformada *Wavelet* Contínua (CWT – *Continuous Wavelet Transform*) pode ser expressa pela equação (4).

$$F(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_{a,b}(t) dt$$

Onde:

$f(t)$ : sinal contínuo no tempo  $t$ ;

$\Psi_{a,b}(t)$ : *wavelet* mãe, base da transformada.

Fonte: (DELMONT, 2003)

(4)

Em (4) os parâmetros  $a$  e  $b$  variam continuamente no conjunto dos reais  $\mathbb{R}$ , sendo a função  $\Psi_{a,b}$  chamada de *wavelet* mãe e definida conforme a equação (5)

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

Onde:

$a$ : parâmetro de escala ou dilatação;

$b$ : parâmetro de tempo ou translação.

(5)

Fonte: (DELMONT, 2003)

Através das equações (4) e (5) verifica-se que a CWT depende de dois parâmetros,  $a$  e  $b$ , que correspondem, respectivamente, às informações de escala e de tempo, ou dilatação e translação. Desta forma um sinal unidimensional  $f(t)$  é transformado em um sinal bidimensional  $F(a,b)$  permitindo uma análise tempo versus frequência assim como na STFT, porém com a resolução aumentada quanto maior forem as frequências, fornecendo uma espécie de *zoom* na escala de tempo das mais altas frequências. (DELMONT, 2003).

Comparando as equações (1) e (4) percebe-se que a CWT representa uma generalização da FT. Tomando a equação (4) e utilizando como *wavelet* mãe a função exponencial complexa obtém-se a equação (1), da FT, como um caso particular da CWT. A CWT é uma transformada linear e sua base é a *wavelet* mãe (OLIVEIRA, 2007).

### 3.2.1 Famílias de *wavelets*

Diversas funções podem ser escolhidas como base ou *wavelet* mãe para a CWT, porém devem ter comportamento oscilatório e de curta duração. A origem do termo *wavelet* se deu pela união dos termos: “oscilatório” (onda) e “curta duração” (ondinha). Daí um dos critérios para verificar se uma função pode ser utilizada como *wavelet* é provar que ela é oscilatória, ou seja, que seu valor médio é nulo. Isto pode ser feito através da integral da equação (6).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0$$

(6)

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

A *wavelet* mãe também deve possuir energia limitada, ou seja, deve ser verificada a condição da equação (7).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^2(t) < \infty \quad (7)$$

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

Diversas funções têm sido estudadas e propostas como *wavelets*. A *wavelet* mais simples é a *Wavelet* de Haar, que consiste em uma função contínua por partes e pode ser empregada na análise de sinais com mudanças abruptas. A equação (8) define a *Wavelet* de Haar e a Figura 14 a ilustra.

$$\psi^{(haar)}(t) = \begin{cases} +1 & \text{para } (0 \leq t < 0,5) \\ -1 & \text{para } (0,5 \leq t < 1) \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (8)$$

Fonte: (DELMONT, 2003)

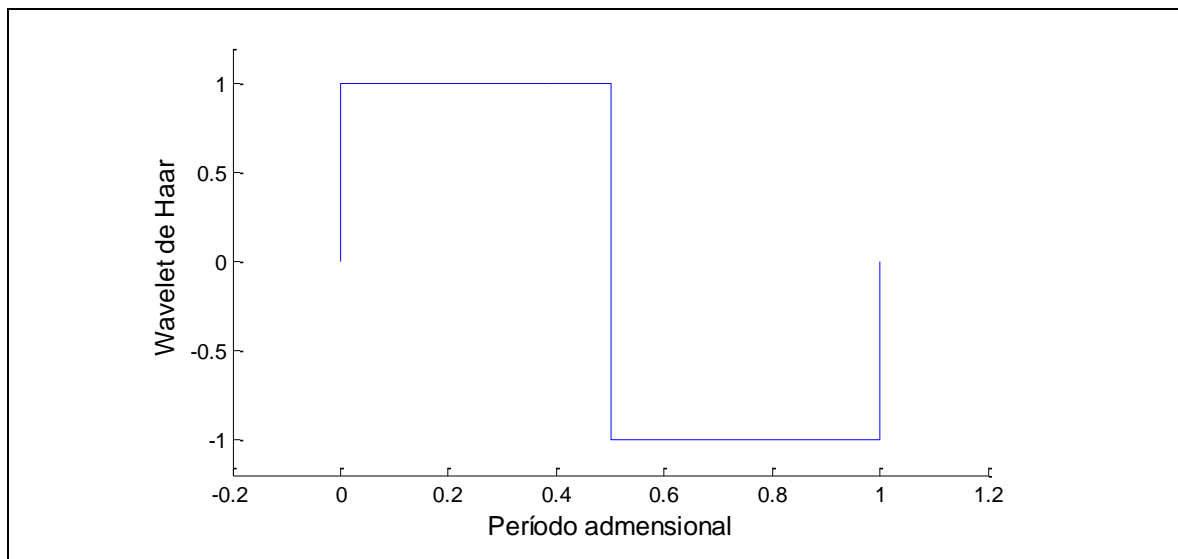


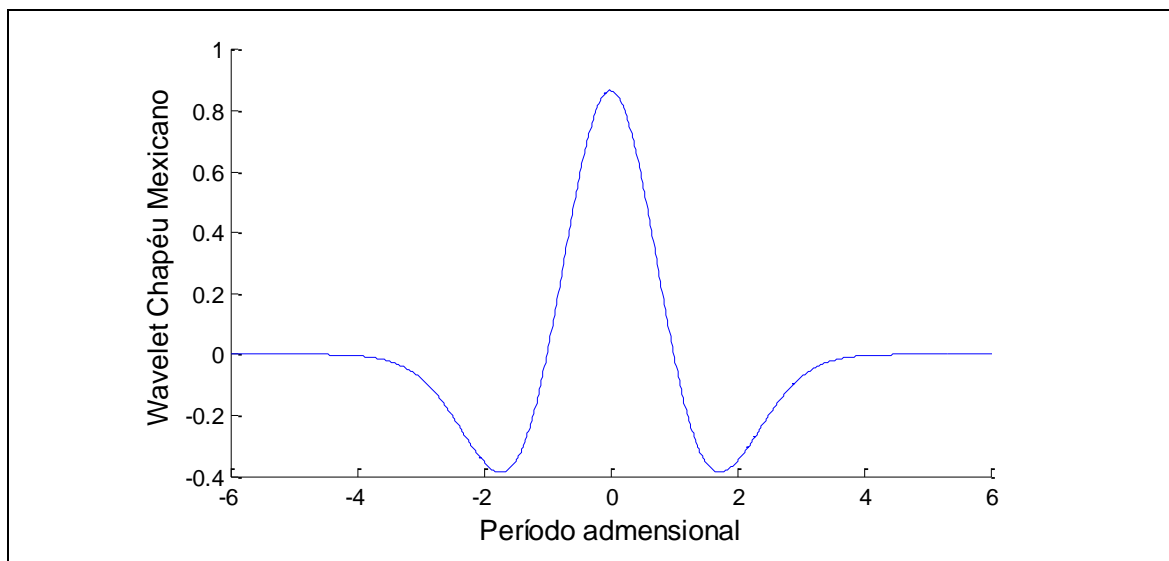
Figura 14: *Wavelet* de Haar.

Fonte: Gerada com MATLAB®.

A *Wavelet* Chapéu Mexicano é definida pela equação (9) e sua forma, já anunciada pelo nome, pode ser vista na Figura 15.

$$\psi^{(mexh)}(t) = \frac{2(t^2 - 1)e^{-t^2/2}}{\pi^{1/4}\sqrt{3}} \quad (9)$$

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)



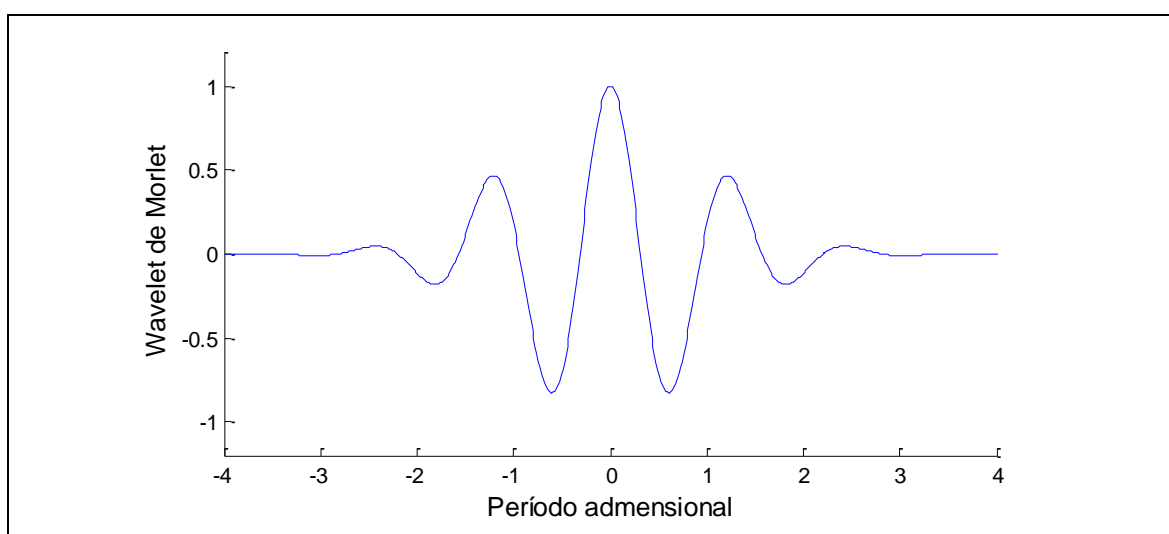
**Figura 15: Wavelet Chapéu Mexicano.**

Fonte: Gerada com MATLAB®.

A *Wavelet* de Morlet foi uma das primeiras propostas com a finalidade de análise de sinais e se originou dos estudos de Morlet sobre geofísica e análise de sinais sísmicos. A *Wavelet* de Morlet está definida na equação (10) e sua forma exemplificada pela Figura 16.

$$\psi^{(morl)}(t) = \frac{1}{\pi^{1/4}} e^{-t^2/2} e^{-jw_0 t} \quad (10)$$

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)



**Figura 16: Wavelet de Morlet.**

Fonte: Gerada com MATLAB®.

A família de *Wavelets* de Daubechies foi descrita, no fim da década de 80, pela pesquisadora Ingrid Daubechies e é uma das mais utilizadas na análise de oscilografias (DELMONT, 2003). As *Wavelets* de Daubechies não são descritas por funções explícitas, mas sim criadas por métodos iterativos (OLIVEIRA, 2007). A Figura 17 mostra a família de *Wavelets* de Daubechies que, em homenagem a sua autora, são nomeadas por “db” seguidas por um número “N” que corresponde a ordem da *wavelet*.

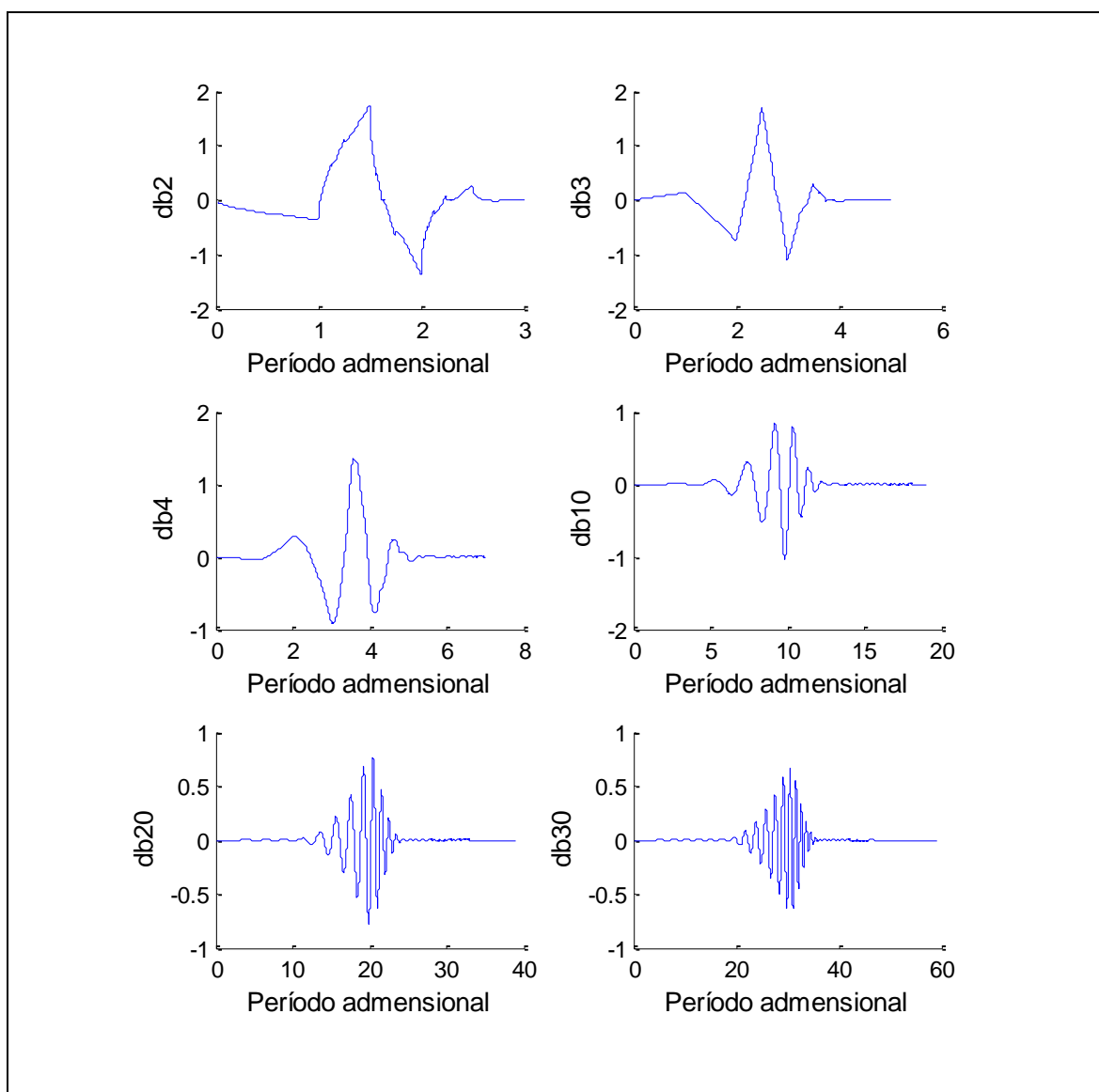


Figura 17: *Wavelets* de Daubechies.  
Fonte: Gerada com MATLAB®.

A gama de possibilidades para *wavelets* é infinita e muitas famílias já foram propostas para diferentes finalidades. O Quadro 2 cita algumas das famílias de *wavelets* mais conhecidas e difundidas na literatura atual.

Sigla de representação da família	Nome da família de <i>wavelet</i>
haar	<i>Wavelet</i> de Haar
db	<i>Wavelet</i> de Daubechies
sym	<i>Wavelet</i> Symlets
coif	<i>Wavelet</i> Coiflets
bior	<i>Wavelet</i> Biortogonal
gaus	<i>Wavelet</i> Gaussiana
mexh	<i>Wavelet</i> Mexicana
meyr	<i>Wavelet</i> de Meyer
morl	<i>Wavelet</i> de Morlet

**Quadro 2: Famílias de *wavelets*.**

**Fonte:** Adaptado de (MISITI et al., 2014).

### 3.3 A TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA - DWT

A WT em sua forma contínua (CWT) é útil essencialmente para estudos teóricos, deduções e verificações de suas propriedades. Para aplicações práticas a discretização da WT é mais eficiente e permite a sua implementação computacional.

Na Transformada *Wavelet* Discreta (DWT – *Discrete Wavelet Transform*) os parâmetros de dilatação e translação não variam continuamente, como no caso da transformada contínua, mas sim discretamente. Em certas aplicações, incluindo aquelas em análise de sinal, podem-se restringir os valores dos parâmetros  $a$  e  $b$  (da equação 5) a uma grade discreta, fixando um passo de dilatação  $a_0$  e um passo de translação  $b_0$ . A equação 11 mostra a forma discreta da transformada em comparação com a forma contínua, primeiramente discretizando apenas os parâmetros de escala e translação ( $a$  e  $b$ ) e depois discretizando também a variável independente (tempo).

$$\begin{aligned} \Psi_{a,b}(t) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \Rightarrow \Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \\ \Psi_{a,b}(t) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \Rightarrow \Psi_{m,n}[k] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Psi\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

Onde:

- $m$  e  $n$  são inteiros;
- $a_0 > 1$ : parâmetro de escala ou dilatação fixo;
- $b_0$ : parâmetro de tempo ou translação fixo;
- $t$ : variável independente contínua.
- $k$ : variável independente discreta.

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

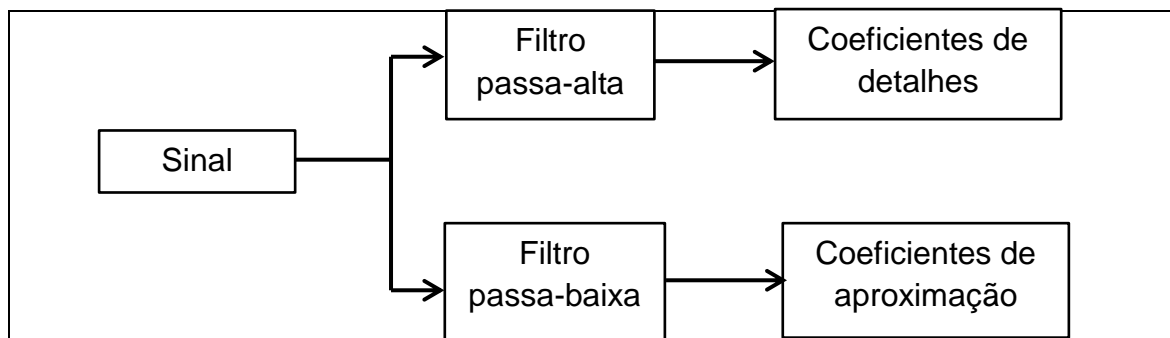
Uma maneira eficiente de aplicar esta transformada é através de filtros, técnica desenvolvida por Mallat em 1986, onde se tem a decomposição da *wavelet* implementando a análise multiresolução. A análise multiresolução é uma técnica que permite analisar sinais em múltiplas bandas de frequências (CASTANON, 2003).

### 3.4 ANÁLISE MULTIRESOLUÇÃO - AMR

A Análise Multiresolução (AMR), também conhecida como algoritmo de Mallat, é um método proposto para implementar a DWT. O detalhamento da relação entre a DWT e a AMR extrapola o escopo deste estudo e pode ser consultado em (WEEKS, 2012) e (OLIVEIRA, 2007).

A transformada pelo método multiresolução obtêm “aproximações” e “detalhes” de um determinado sinal através da passagem deste por um filtro passa-alta e outro filtro passa-baixa. O filtro passa-alta produz os coeficientes de detalhe e o filtro passa-baixa produz coeficientes de aproximação da decomposição do sinal. Este processo de decomposição *wavelet* por meio de filtros é ilustrado na Figura 18 (PARRAGA, 2002).



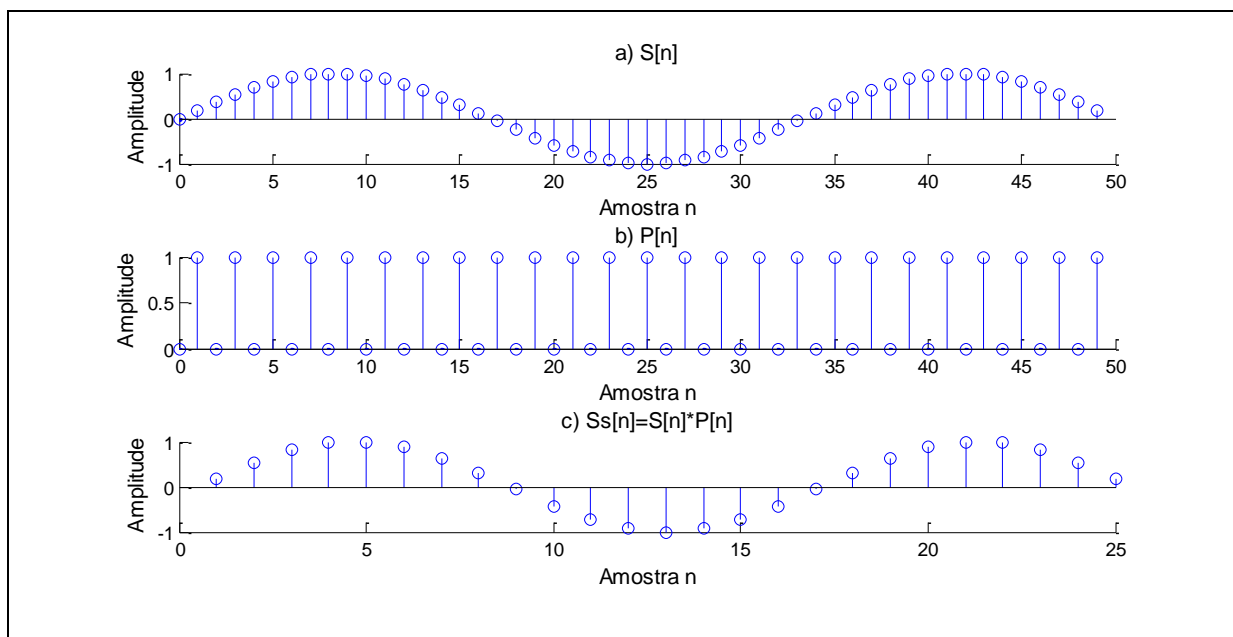


**Figura 18: Decomposição wavelet com filtros.**

Fonte: Adaptado de (PARRAGA, 2002).

O coeficiente de aproximação é uma representação de baixa frequência do sinal original e o coeficiente de detalhe é a diferença entre dois coeficientes de aproximação sucessivos. A aproximação tem a mesma tendência geral do sinal original e o detalhe mostra as componentes de alta frequência (SILVA, 2008).

Os filtros utilizados na AMR têm como características filtrar e reamostrar o sinal. A reamostragem, ou *downsample*, diminui a taxa de amostragem original do sinal, eliminando pontos intercalados. Reamostrar por um fator dois significa que a cada dois pontos um é eliminado. O resultado é um sinal com metade do número de amostras do original, onde uma amostra “n” do sinal reamostrado corresponde à amostra “2n” do sinal original, porém o instante de tempo associado a essa amostra é o mesmo (PARRAGA, 2002).



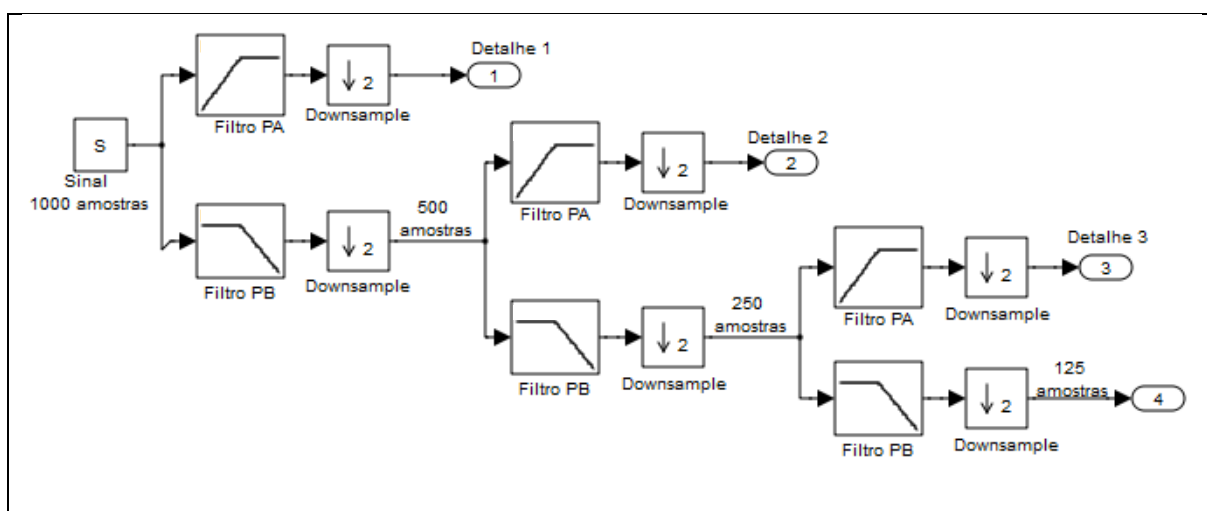
**Figura 19: Exemplo de *downsample*. a) Sinal original. b) Reamostrador. c) Sinal reamostrado.**

Fonte: Adaptado de (MIX e OLEJNICZAK, 2003).

O *downsample* pode ser realizado multiplicando um sinal  $S[n]$  por um sinal  $P[n]$  tal que  $P[n]$  seja formado por uma sequência de zeros e uns, o que resulta

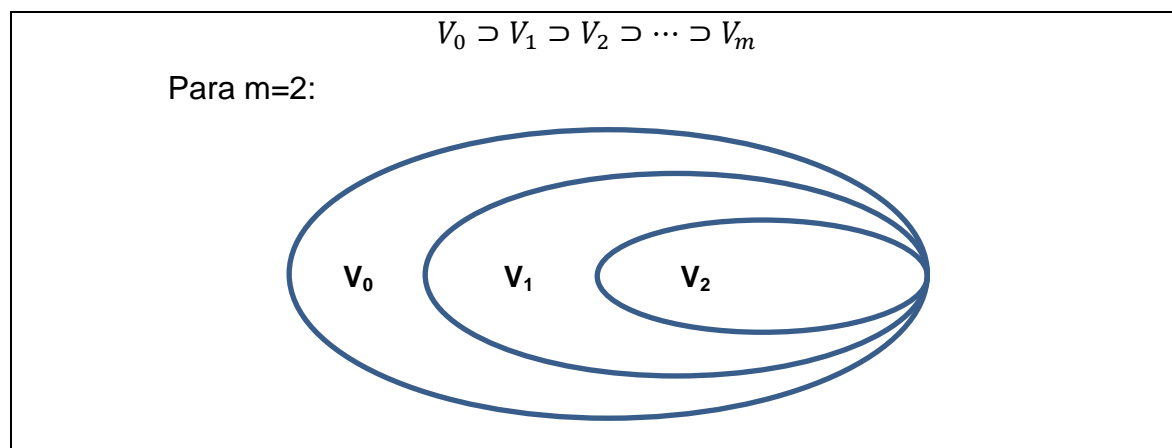
em um sinal  $Ss[n]$  comprimido e sem perder informações como exemplifica a Figura 19 (MIX e OLEJNICZAK, 2003).

O processo de decomposição *wavelet* da análise multiresolução corresponde a uma decomposição em sub-bandas, que pode ser implementada com um banco de filtros que realizam uma sucessiva decomposição e reamostragem nos coeficientes de aproximação. Através do processo ilustrado na Figura 20, e que também é chamado de árvore de decomposição *wavelet*, obtêm-se uma análise aproximada de todo o espectro de frequências (SILVA, 2008).



**Figura 20: Decomposição com banco de filtros.**  
Fonte: Autoria própria.

Em termos de álgebra linear a decomposição com banco de filtros cria uma sequência de espaços vetoriais aninhados ou subconjuntos, de tal maneira que cada etapa da filtragem corresponde a um *zoom* no sinal original, como exemplifica a Figura 21.

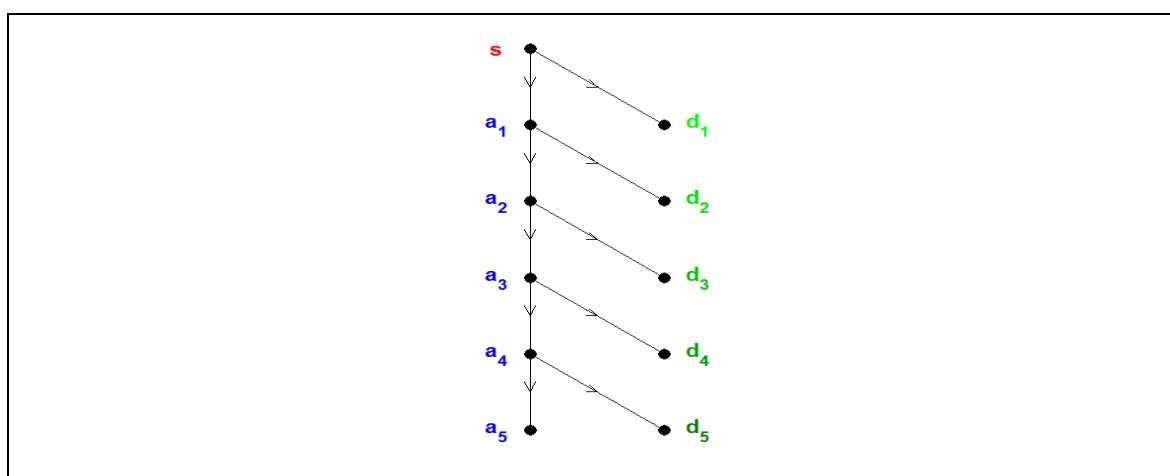


**Figura 21: Decomposição por banco de filtros na forma de espaços vetoriais.**  
Fonte: Adaptado de (PARRAGA, 2002).

### 3.5 APLICAÇÃO

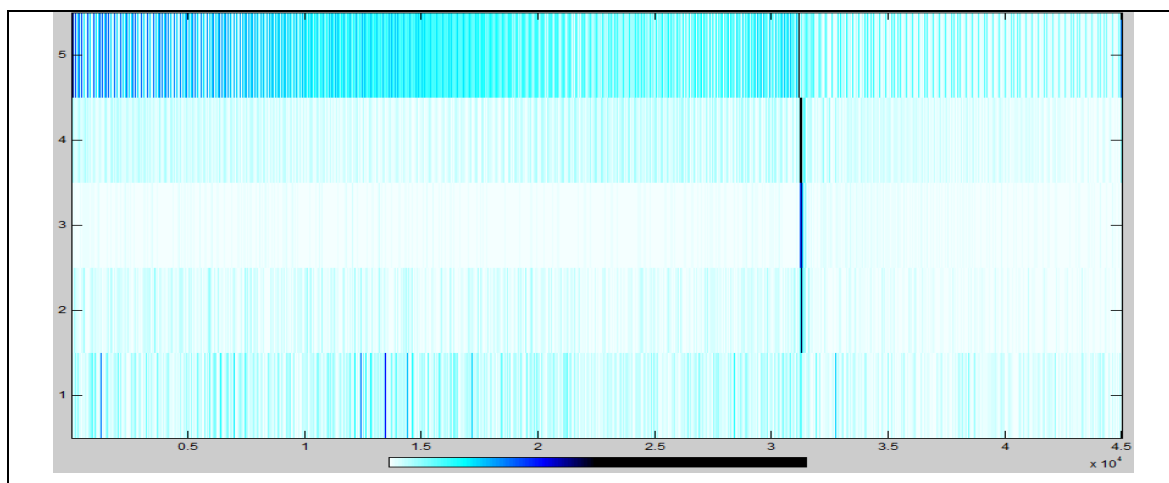
A fim de exemplificar, uma análise *wavelet* foi aplicada no mesmo registro de oscilografia usado na análise por meio da STFT na Figura 12. Este registro é um sinal de tensão registrado durante uma desenergização de um gerador, onde a tensão decresce lentamente. Na sequência deste tópico são mostrados alguns gráficos e figuras que auxiliam na compreensão do método. Para realizar a análise foi utilizado o *Wavelet Toolbox* do MATLAB®.

A *wavelet* mãe empregada para esta análise é a Daubechies de 5ª ordem (db5) por ser uma das mais empregadas na análise de oscilografias (DELMONT, 2003). A decomposição foi aplicada cinco vezes nos coeficientes de aproximação, ou seja, até o quinto nível, produzindo cinco coeficientes de detalhes. A Figura 22 mostra a árvore *wavelet* da análise realizada.



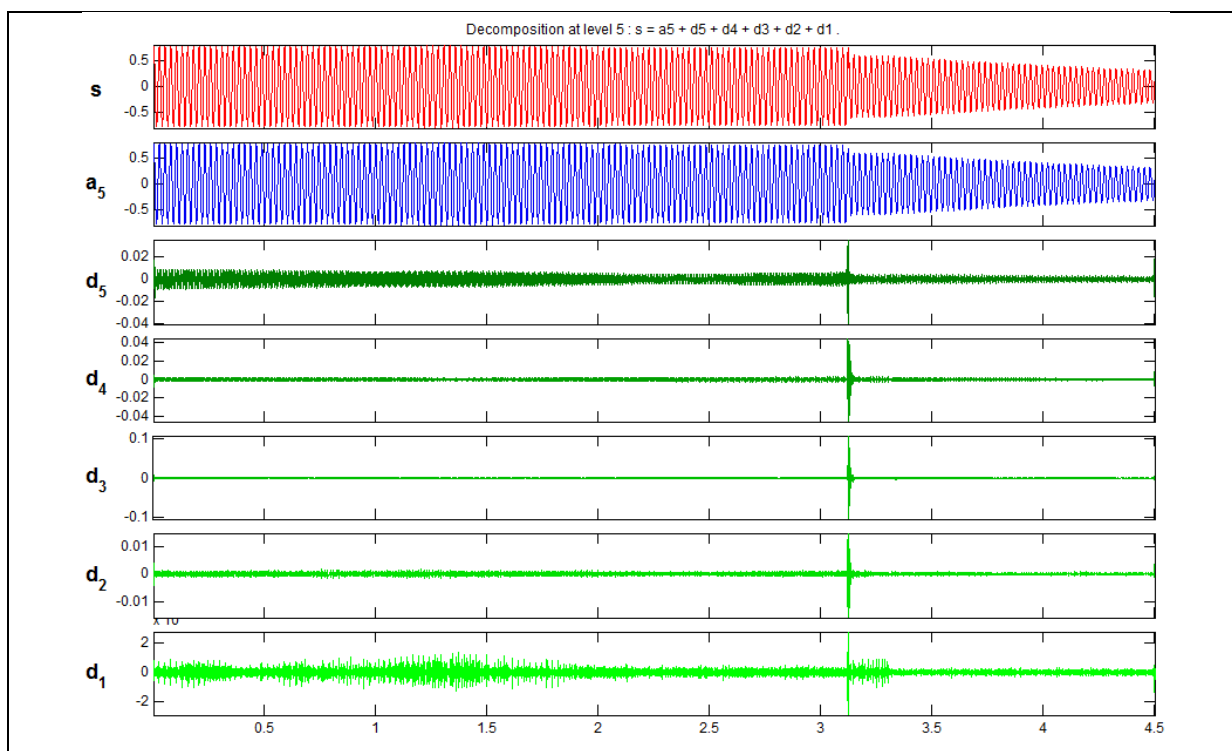
**Figura 22:** Árvore de decomposição *wavelet* até o quinto nível.  
**Fonte:** (MISITI et al., 2014).

Através da representação dos coeficientes de detalhes em escala de cores da Figura 23 pode-se visualizar a ocorrência da escala máxima coincidindo com o instante de mudança abrupta no sinal original.



**Figura 23: Visualização da magnitude dos coeficientes de detalhe por escala de cores.**  
**Fonte: Obtida com *Wavelet Toolbox*.**

Através da visualização da magnitude dos coeficientes de detalhes, os quais representam altas frequências, é possível identificar quais amostras contém informações de variações bruscas no sinal original. A Figura 24 mostra os coeficientes de maneira separada. Observando os coeficientes de detalhes percebe-se que estes tem predominância de magnitude quase nula, com exceção para a proximidade do instante que ocorre a variação do sinal original, quando apresentam um pico de magnitude.



**Figura 24: Visualização da magnitude dos coeficientes de detalhe.**  
**Fonte: Obtida com *Wavelet Toolbox*.**

Fica evidente a possibilidade de utilizar as informações dos coeficientes de detalhes para determinar os instantes de ocorrências de perturbações nos sinais de oscilografias, permitindo realizar a segmentação destes em antes, durante e depois de uma perturbação (UKIL e ZIVANOVIC, 2007).

## 4. ESTUDOS DE CASO

Para verificar as reais possibilidades de aplicação da DWT e dos seus coeficientes na análise de oscilografias, foram realizados dois estudos de caso com registros de ocorrências reais em unidades geradoras. Os tópicos seguintes descrevem sucintamente a origem dos registros, mostram uma visualização dos mesmos e os resultados obtidos com a aplicação da DWT.

### 4.1 CASO 1: DESLIGAMENTO FORÇADO POR CURTO CIRCUITO

Este caso faz parte da base de oscilografias disponibilizadas para estudo por uma concessionária de geração de energia do SIN, e foi escolhido por representar o desligamento forçado de uma unidade geradora devido a um curto-circuito.

As características do sistema são descritas no Quadro 3 e o ponto de ocorrência da falta foi o para-raios da fase B no lado de alta tensão do transformador elevador da unidade.

<b>Usina termoeletrica movida a carvão</b>
Unidade geradora 2
Potência ativa: 12MW
Potência reativa: 5,4 Mvar
Tensão de operação: 6 kV
Frequência de operação: 50 Hz
Gerador conectado em triângulo
Transformador elevador 6kV para 69kV
Lado de alta do transformador conectado em estrela

**Quadro 3: Características da unidade geradora.**

**Fonte: Relatório da ocorrência disponibilizado para estudos.**

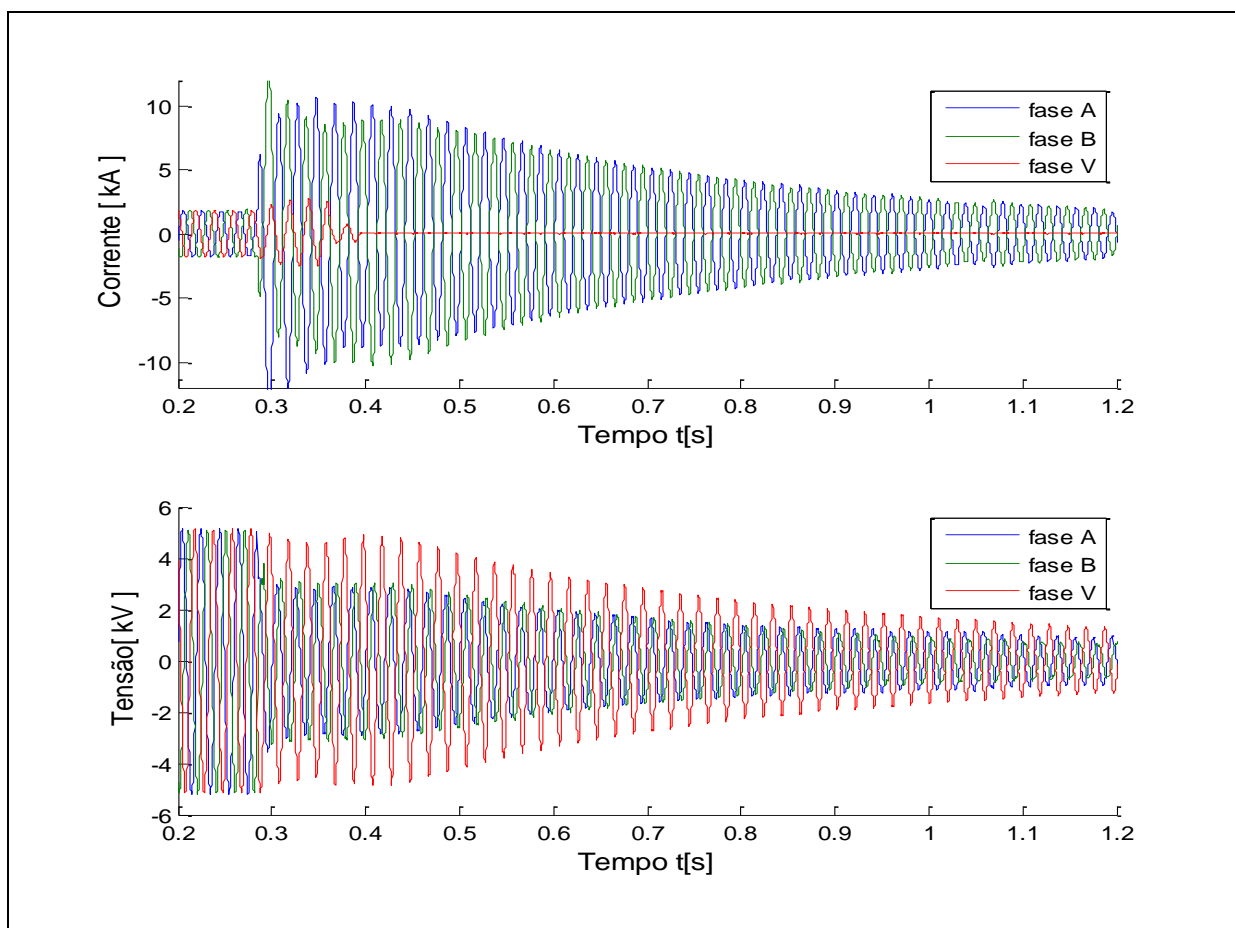
O relatório disponibilizado pela concessionária descreve a ocorrência da seguinte forma:

Desligamento automático da unidade 2 da UT... provocado pela atuação da proteção diferencial da unidade. Os registros oscilográficos e a sequência de eventos indicam a ocorrência de um curto-circuito na fase B do lado de alta do transformador da unidade 2, caracterizado por uma sobrecorrente de

2696A na fase citada anteriormente. Verificou-se uma subtensão nos terminais das unidades associada à sobrecorrentes de cerca de 8000A no instante da falta. Os valores pré-falta das correntes das unidades eram de aproximadamente 1200A. Após a eliminação da falta com a abertura do disjuntor da unidade 2, as demais unidades continuaram a operar normalmente.

...houve a explosão do para-raio localizado no lado de alta do transformador da unidade 2, o que provocou o curto circuito para terra na fase B.

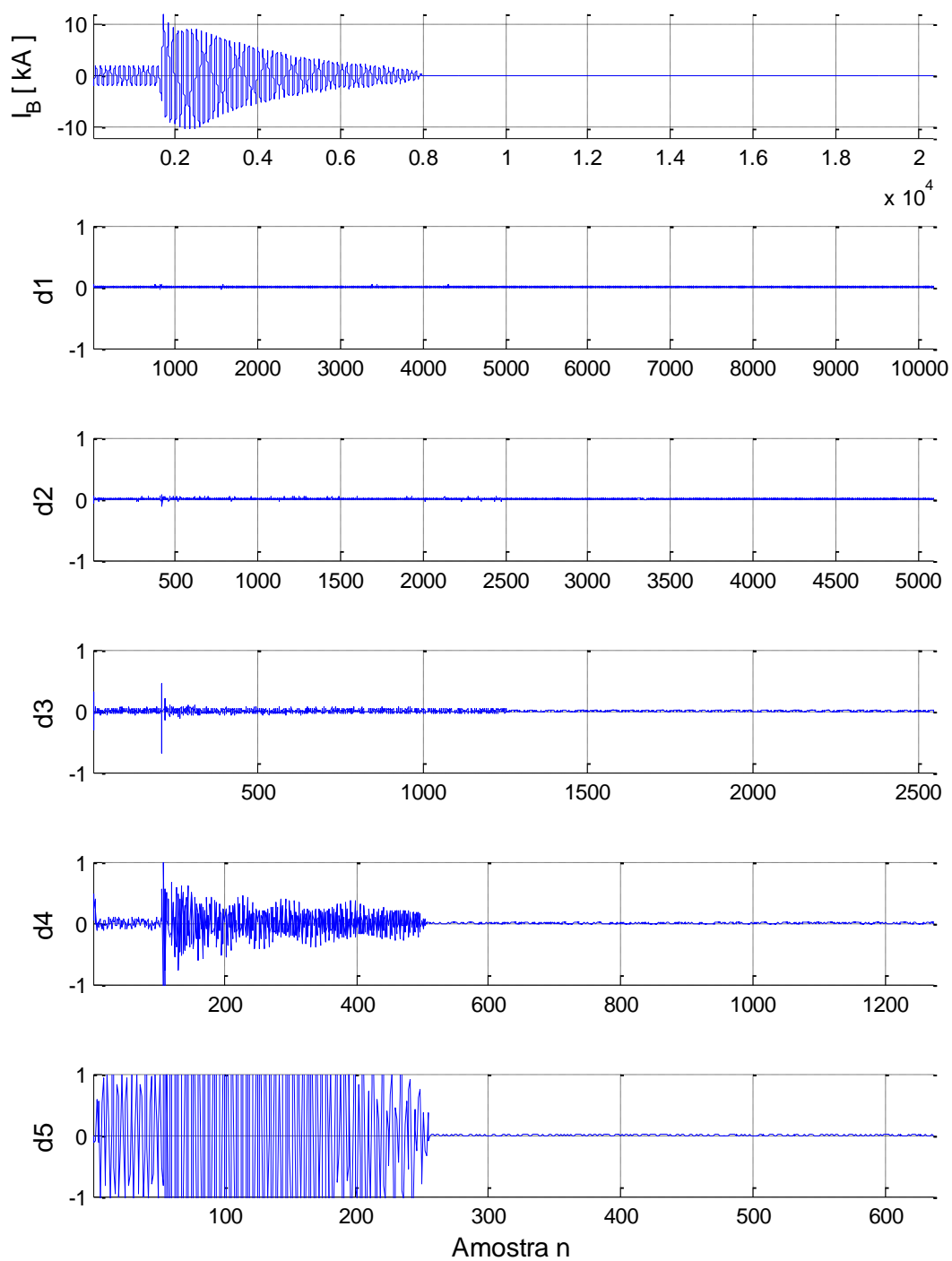
A Figura 25 mostra o registro de oscilografia de curta duração das correntes e tensões da unidade geradora 2, envolvida na falta. Devido à ausência de algumas características do sistema em que a unidade estava conectada os dados são apresentados em suas unidades primárias e não estão normalizados em p.u..



**Figura 25: Visualização das correntes e tensões da unidade geradora 2.**

**Fonte: Autoria própria.**

O registro de corrente da fase “B” foi submetido a análise com a DWT, com a *wavelet* mãe db5. Os coeficientes de detalhe até o quinto nível de decomposição são mostrados na Figura 26.

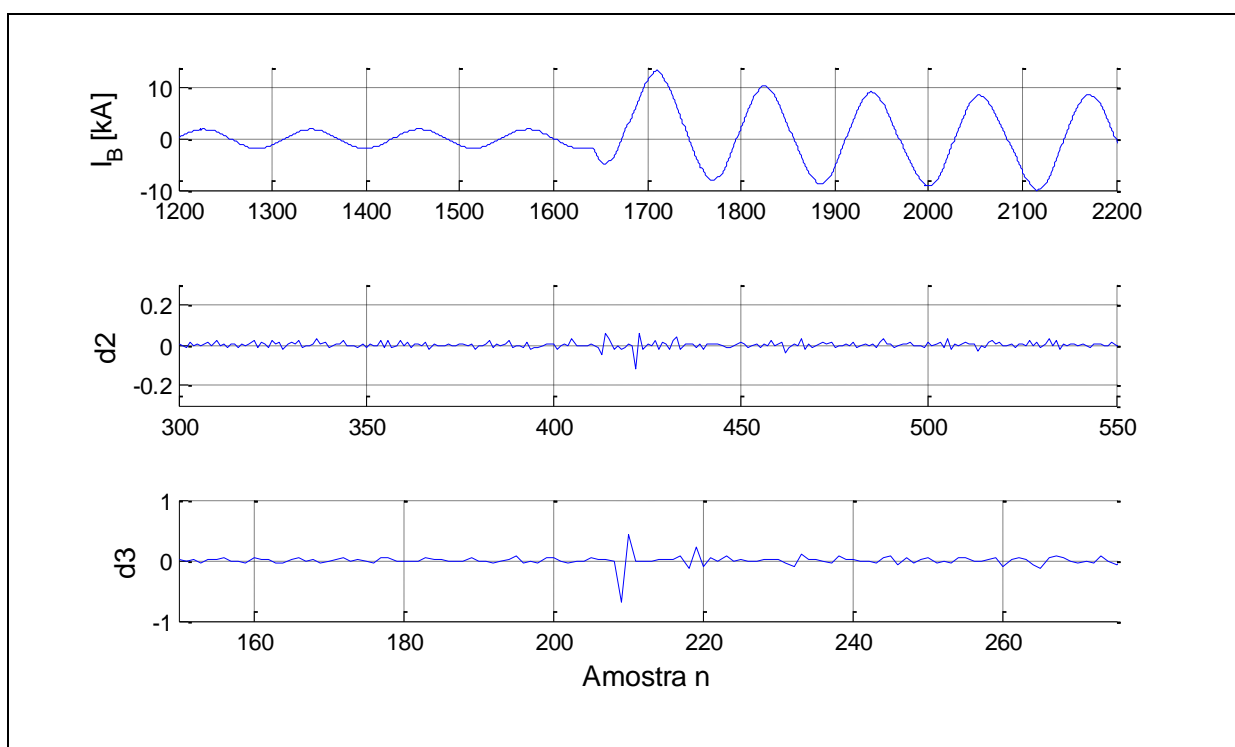


**Figura 26: DWT da corrente de falta.**  
**Fonte: Autoria própria.**



Na Figura 26 os coeficientes estão plotados com a mesma escala de amplitude para evidenciar as diferentes características de cada coeficiente. A escolha de qual coeficiente utilizar para determinar o instante da falta também passa pela escolha da *wavelet* mãe mais adequada. De acordo com Costa (2010) a família das *wavelets* Daubechies tem sido amplamente utilizada na análise de oscilografias e dentre elas a db4 e a db6 tem se destacado.

A Figura 27 mostra os coeficientes d2 e d3 em uma escala mais apropriada às suas amplitudes. Com um zoom na escala das amostras evidenciando a ocorrência de um pico no valor dos coeficientes nas amostras associadas ao instante da falta.



**Figura 27: Coeficientes de detalhe d2 e d3.**

**Fonte: Autoria própria.**

Para identificar o instante de tempo da falta pode-se relacionar a amostra de máximo valor com o tempo associado a esta amostra, fornecido pela oscilografia. Desta forma para o coeficiente d2 o instante de tempo corresponde ao índice  $t_{[4n]}$  e para o coeficiente d3 a  $t_{[8n]}$ . Porém como os valores dos coeficientes podem assumir valores negativos é vantajoso calcular a sua energia. Este cálculo é feito através da integral discreta das amostras dos coeficientes, conforme mostra a equação 12.

Energia do sinal original:

$$E = \sum_{k=1}^{k=n} |I[k]|^2$$

Energia dos coeficientes de detalhe:

$$E_{d_j} = \sum_{k=1}^{k=n/2^j} |d_{j[k]}|^2$$

(12)

Onde:

$I$ : sinal original;

$n$ : número de amostras do sinal original;

$k$ : índice da amostra atual;

$d_j$ : coeficiente de detalhe;

$j[k]$ : índice do coeficiente de detalhe;

Fonte: (COSTA, 2010)

A Figura 28 mostra a comparação da energia calculada para o coeficiente de detalhe d3 em comparação com os valores assumidos pelo coeficiente para as amostras próximas do momento da falta.

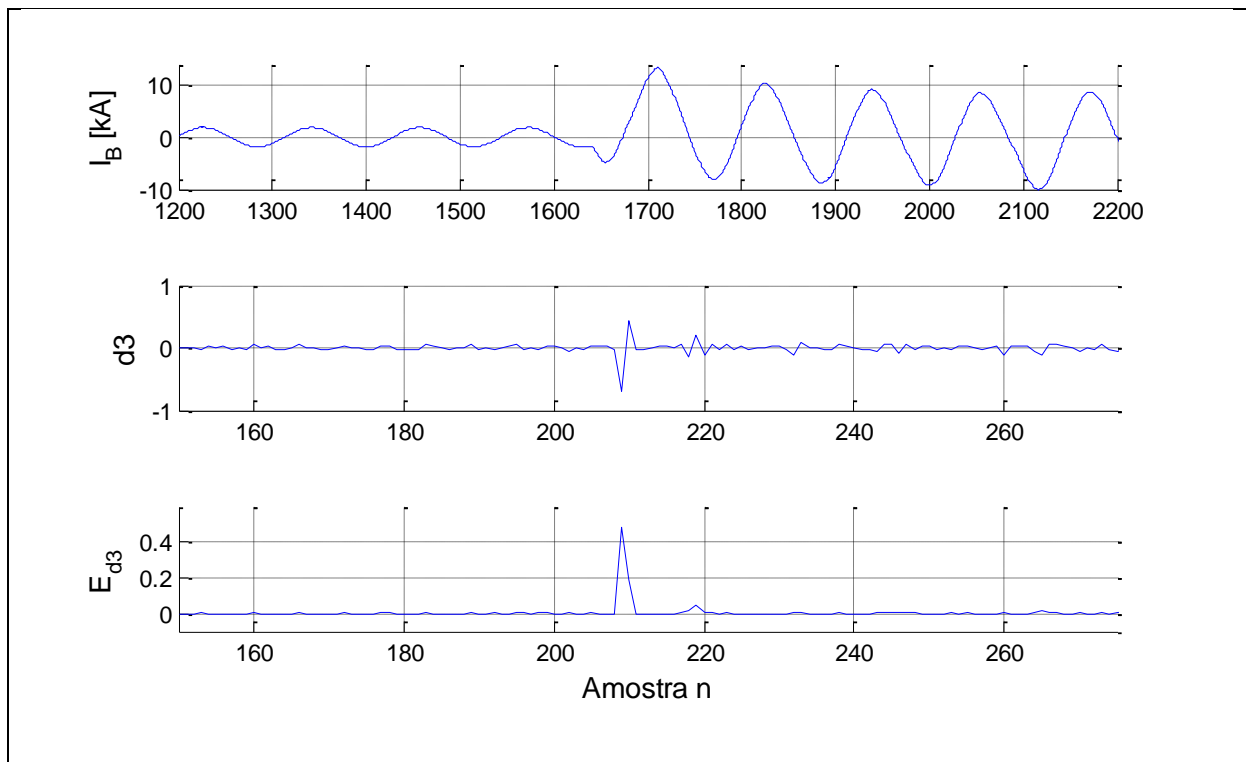


Figura 28: Energia do coeficiente de detalhe d3.

Fonte: Autoria própria.

A energia dos coeficientes aumenta de forma brusca no momento da ocorrência de transitórios no sinal original e, de acordo com Costa (2010), a identificação deste pico de energia é uma forma apropriada para a determinação do

instante de ocorrência do transitório e consequentemente da falta. A partir da determinação do instante que ocorreu a falta pode-se proceder com a segmentação do registro em pré-falta e pós-falta extraíndo características uteis no diagnóstico.

Para detectar o ponto de transitório, ou momento da falta, através da energia dos coeficientes de detalhe basta calcular a diferença entre os valores de energia para amostras sucessivas do coeficiente, ou ainda, adotar uma janela de até quatro coeficientes. Assim pode-se estabelecer um limiar de aumento de energia e quando este for ultrapassado determina-se em qual amostra ocorreu o transitório. Costa (2010) utilizou como limiar, para considerar um aumento brusco de energia, que a energia de uma amostra seja no mínimo três vezes maior que o valor de energia da quarta amostra anterior, como mostra a equação 13. A Figura 29 mostra o aumento da energia do coeficiente d3 no momento da falta.

Limiar da diferença de energia entre amostras consecutivas:

$$\frac{E_{(n)} - E_{(n-4)}}{E_{(n-4)}} \geq 3$$

Onde:

$E_{(n)}$ : energia da amostra atual;

$E_{(n-4)}$ : energia da quarta amostra anterior;

$(n - 4)$ : janela de quatro amostras;

(13)

Fonte: (COSTA, 2010)

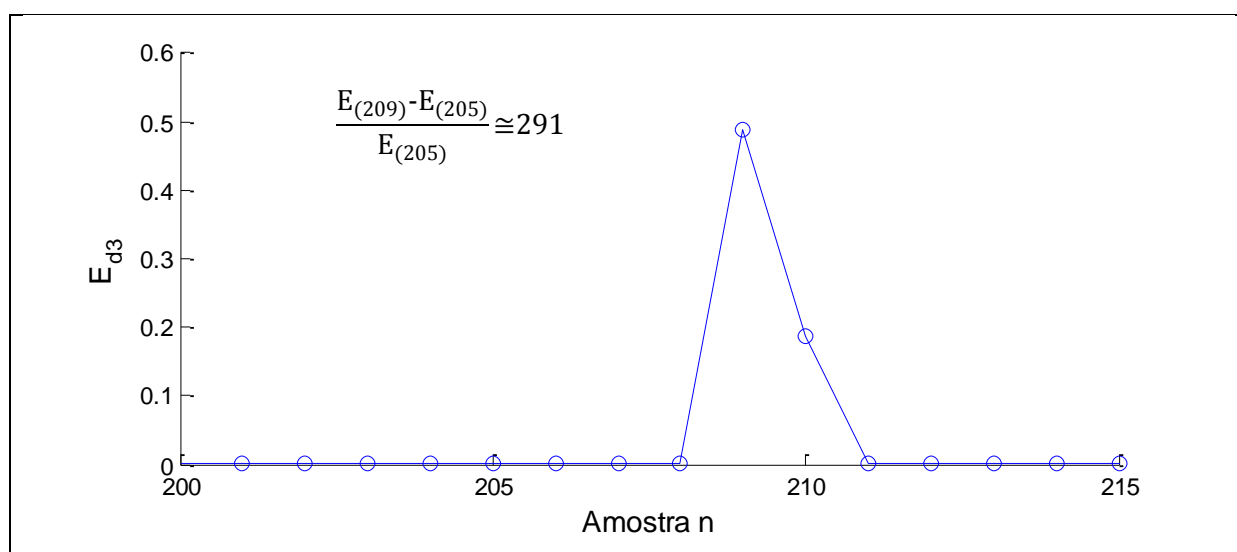


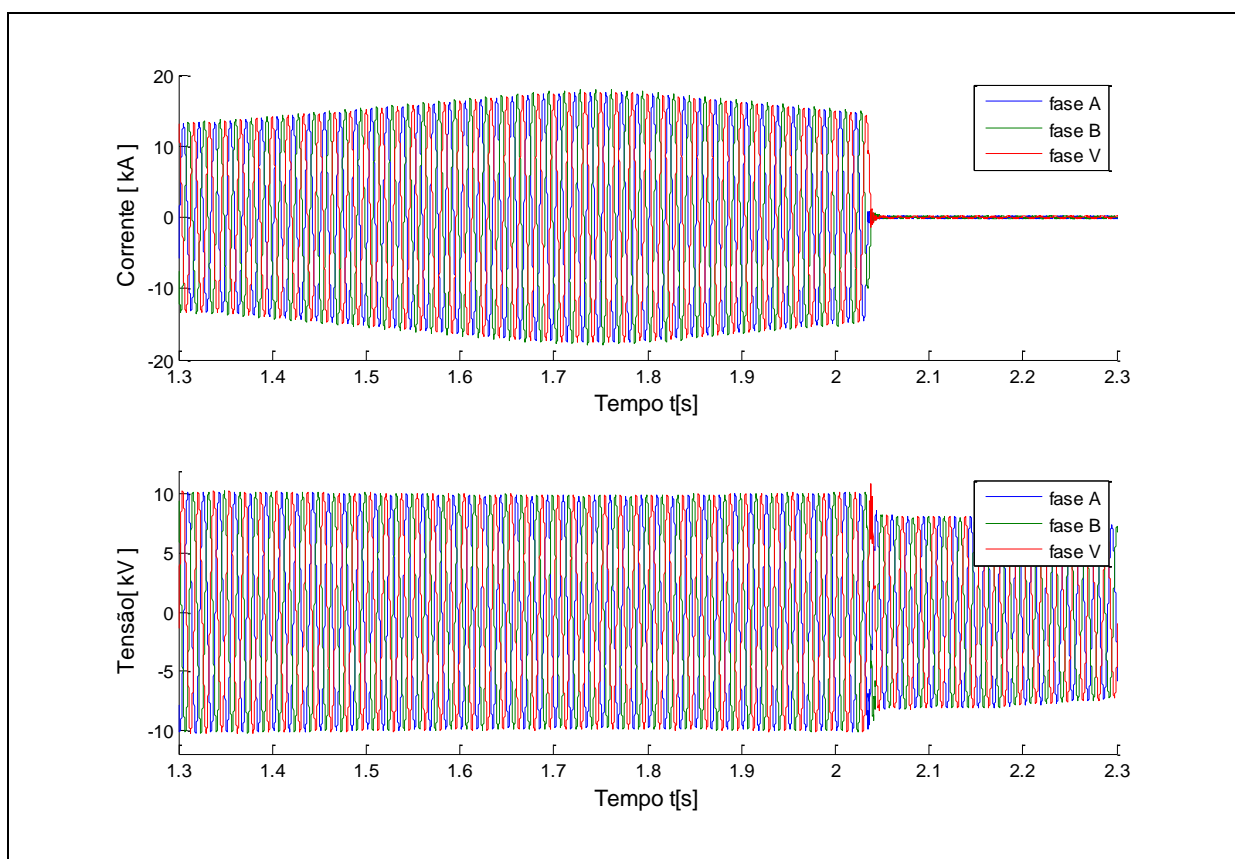
Figura 29: Aumento brusco da energia do coeficiente de detalhe d3.

Fonte: Autoria própria.

## 4.2 CASO 2: DESLIGAMENTO POR PERDA DE EXCITAÇÃO

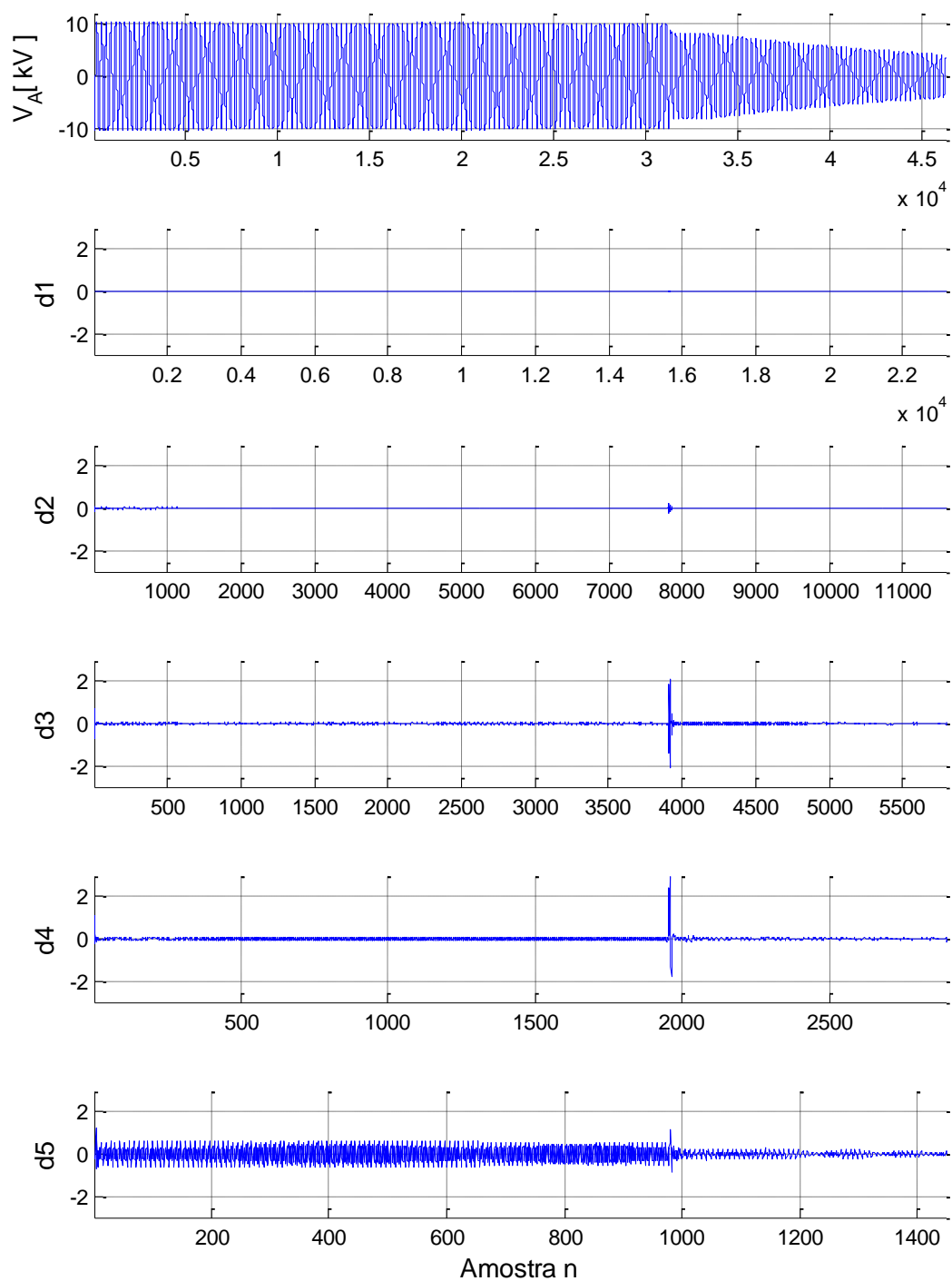
Para testar a aplicação da análise *wavelet* em registros de desligamentos não ocasionados por curto circuito utilizou-se um registro de desligamento causado por perda de excitação em uma unidade geradora. Este registro também foi disponibilizado para estudo por uma concessionária de geração de energia do SIN.

A Figura 30 mostra o registro de oscilografia de curta duração das correntes e tensões da unidade geradora



**Figura 30: Visualização das correntes e tensões da unidade geradora.**  
**Fonte: Autoria própria.**

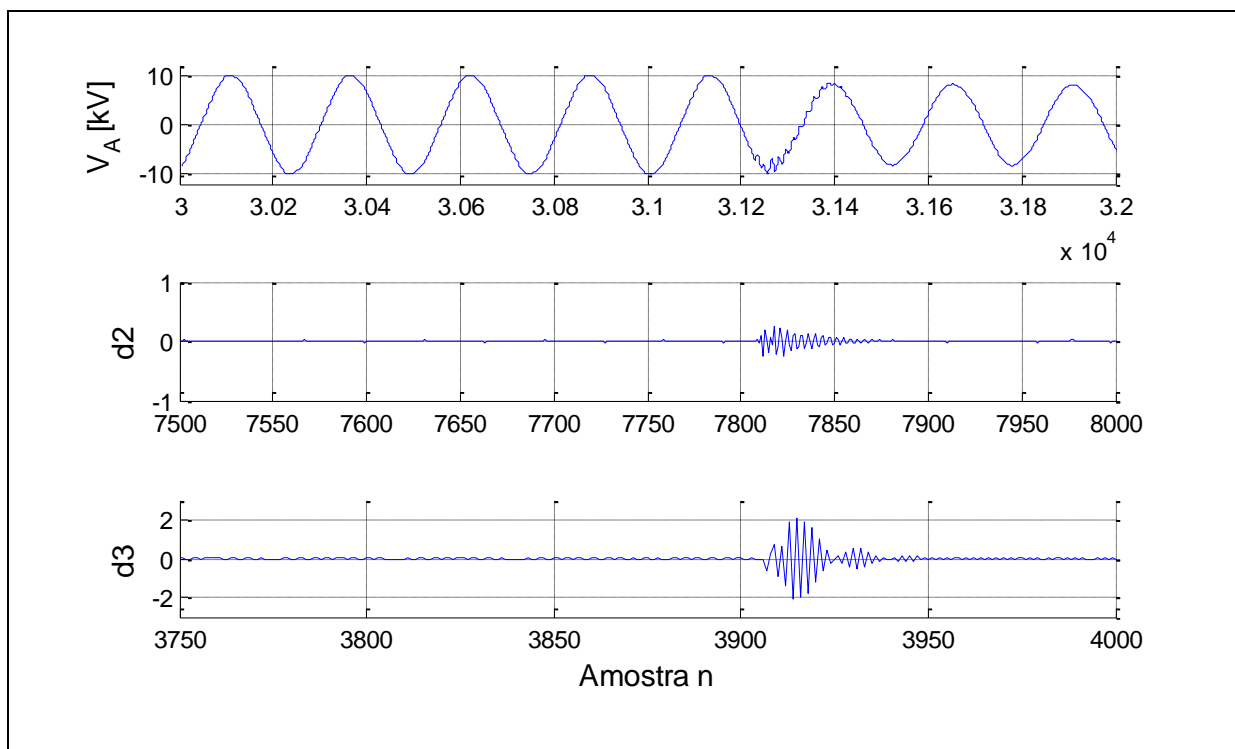
O registro de tensão da fase “A” foi submetido a análise com a DWT, com a *wavelet* mãe db5. Os coeficientes de detalhe até o quinto nível de decomposição são mostrados na Figura 31.



**Figura 31: DWT da tensão fase A.**  
**Fonte: Autoria própria.**

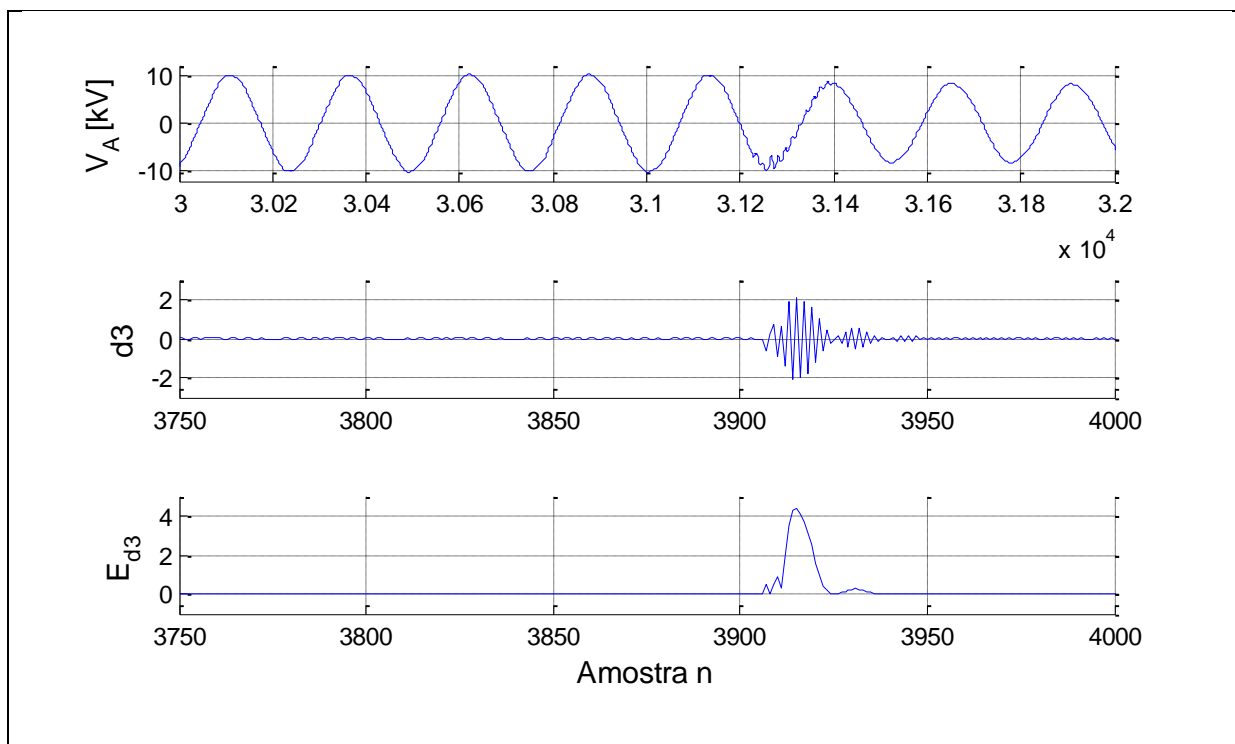
Na Figura 31 os coeficientes estão plotados com a mesma escala de amplitude para evidenciar as diferentes características de cada coeficiente.

A Figura 32 mostra os coeficientes d2 e d3 em uma escala mais apropriada às suas amplitudes. Com um zoom na escala das amostras evidencia-se a ocorrência de um pico no valor dos coeficientes nas amostras associadas ao instante do desligamento.



**Figura 32: Coeficientes de detalhe d2 e d3.**  
**Fonte: Autoria própria.**

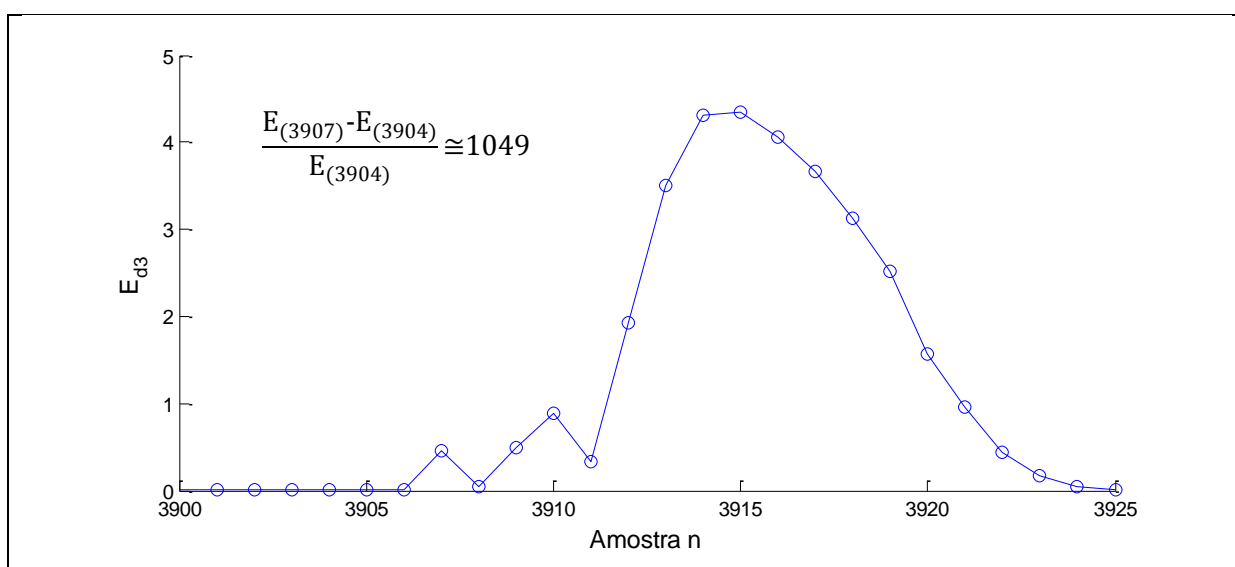
A Figura 33 mostra a comparação da energia calculada para o coeficiente de detalhe d3 em comparação com os valores assumidos pelo coeficiente para as amostras próximas do momento do desligamento.



**Figura 33: Energia do coeficiente de detalhe d3.**

Fonte: Autoria própria.

A Figura 34 mostra o aumento da energia do coeficiente d3 no momento do desligamento.



**Figura 34: Aumento brusco da energia do coeficiente de detalhe d3.**

Fonte: Autoria própria.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste estudo permitiu a revisão de conceitos matemáticos e de processamento digital de sinais, em especial, adquirir novos conhecimentos teóricos sobre a transformada *wavelet*. A transformada *wavelet* pode, simplificada, ser definida como uma generalização da transformada de Fourier.

Com a aplicação da transformada *wavelet* nos estudos de casos verificou-se a eficiência do método para a análise de oscilografias de unidades geradoras. A família de *wavelets* de Daubechies é a mais utilizada em análises de sinais não estacionários. Os coeficientes de detalhes contêm informações que permitem identificar o instante da ocorrência de transitórios em registros de oscilografias de unidades geradoras de energia elétrica. O cálculo da variação de energia dos coeficientes é um método eficiente para localizar os transitórios e pode ser implementado através de algoritmos.

Nos testes realizados com a *wavelet* mãe db5 o coeficiente de detalhe d3 se mostrou adequado para ser utilizado em algoritmos no cálculo da variação de energia entre as amostras. Assim é possível identificar a amostra em que ocorre variação brusca de energia e determinar o instante de tempo que ocorreu a falta, dividindo o registro para extrair características pré e pós falta.



## REFERÊNCIAS

ANDERSON, Paul M. **Power System Protection**. New York: IEEE Press, 1998.

ANEEL. **Qualidade da Energia Elétrica**: Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional, módulo 8. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008.

BRITO, Núbia S. D.; SOUZA, Benemar A. D.; COSTA, Flávio B. **Automação na análise de ocorrências**: a contribuição da Chesf para o desenvolvimento de novas técnicas. III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Belém - PA: Sociedade Brasileira de Automática. 2010. p. 1 a 6.

CÂNDIDO, Crisluci K. S. S. **Classificação de distúrbios na rede elétrica usando redes neurais e wavelets**. Dissertação (Programa de pós-graduação em engenharia elétrica). ed. Natal - RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, 2008.

CARDOSO, Rafael. Guia prático para configuração, coleta e utilização de oscilografias em relés digitais. Disponível em: <<http://www.selinc.com.br>>. Acesso em: 25 de outubro de 2013.

CARVALHO, Tadeu F. D.; D'OTAVIANO, Itala M. L. Sobre Leibniz, Newton e infinitésimos, das origens do cálculo infinitesimal aos fundamentos do cálculo diferencial paraconsistente. **Educação Matemática Pesquisa**, São Paulo, 2006. 13-43.

CASTANON, César A. B. **Recuperação de imagens por conteúdo através de análise multiresolução por wavelets**. Dissertação (Instituto de Ciências Matemáticas e Computação da Universidade de São Paulo). ed. São Carlos - SP: Universidade de São Paulo, 2003.

COSTA, F. B et al. **A tool for fault and power quality disturbance analysis in oscilographic records**. International Youth Conference on Energetics. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. Trabalho completo.

COSTA, Flávio B. **Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na transformada wavelet para uso em registradores digitais de perturbação**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). ed. Campina Grande - PB: Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

DAVILA, H. Records from DFRs vs. Records from microprocessor-based relays. **Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America**, nov. 2010. 635-644.

DELMONT, Odilon F. **Utilização da transformada wavelet para caracterização de distúrbios na qualidade de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. ed. São Carlos: [s.n.], 2003.

FARIA, Luiz et al. Training Control Centers' Operators in Training Control Centers' Operators in Using Intelligent Tutoring Systems. **Learning Technologies, IEEE Transactions on**, v. 2, n. IEEE Computer Society, p. 135 - 147, April-June 2009.

GIOVANINI, Renan et al. SPERT - Sistema Integrado para Análise de Perturbações. **IX Seminário Técnico de Proteção e Controle (IX STPC)**, Belo Horizonte - Brasil, 2008. CD-ROM.

IEEE STD. **C37.111-2013**: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems. 2<sup>a</sup>. ed. New York - USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2013.

IEEE STD. **C37.111-1999**: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems. 1<sup>a</sup>. ed. New York - USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1999.

KEZUNOVIC, M; LIAO, Y. **Automated analysis of power quality disturbances**. CIRED2001. 16<sup>a</sup> International Conference and Exhibition. Texas A&M University, USA: (IEE Conf. Publ No. 482). 2001. p. 5 vol 2.

LACHMAN, Márcio. **Sistema de Monitoração Remota e Avaliação do Estado Operativo de Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs) Instalados em Subestações em Operação**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis - SC: Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). 2007.

LENZ, Everton P. **Avaliação do desempenho de relés digitais de proteção de unidades geradoras utilizando registros de oscilografia e sequência de eventos**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). ed. Florianópolis - SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

MENESES, Lair; ROCHA, Luiz. **Sistema inteligente de processamento de oscilografia para identificação e classificação de faltas em sistemas de energia elétrica**. IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de Educação Tecnológica. Belém - PA: IV CONNEPI. 2009.

MISITI, Michel et al. **Wavelet Toolbox: User's Guide**. R2014a. ed. www.mathworks.com: The MathWorks, Inc., 2014.

MIX, Dwight F.; OLEJNICZAK, Kraig J. **Elements of Wavelets for Engineers and Scientists**. New Jersey: Wiley-interscience, 2003.

MORETO, Miguel. **Análise automática de registros digitais de perturbações em unidades geradoras**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). ed. Florianópolis - SC: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2011.

MORETO, Miguel; ROLIM, Jacqueline G. Análise automática de oscilografias em sistemas elétricos de potência. **Revista Controle & Automação**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 347-362, Julho e Agosto 2010.

OLIVEIRA, Hélio M. D. **Análise de sinais para engenheiros: uma abordagem via Wavelets**. Rio de Janeiro: Brasport, 2007.

ONS. **Análise de perturbação**: Procedimentos de rede, submódulo 22.3. Rio de Janeiro: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2009.

ONS. **Registro de Perturbações**: Procedimentos de Rede, submódulo 11.6. Rio de Janeiro: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2009.

PARRAGA, Adriande. **Aplicação da transformada wavelet packet na análise e classificação de sinais de vozes patológicas**. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). ed. Porto Alegre - RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

PEREIRA, Roberto M.; SPRITZER, Ilda M. D. P. A. Automação e digitalização em subestações de energia elétrica: um estudo de caso. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 3, n. 4, p. 147-160, 2007.

PEREZ, Joe; RINCON, Cesar. **A guide to transformer digital fault recording event analysis**. Protective Relay Engineers, 2012 65th Annual Conference for. College Station, TX: [s.n.]. 2012. p. 358 a 373.

REASON. **Manual de instruções RPV 310**. Florianópolis - SC: Reason Tecnologia S.A, 2010.

SANTOS, Athila Q. **WAPS**: software para visualização e análise de faltas a partir de arquivos do padrão IEEE COMTRADE. Monografia (Graduação em Engenharia de

Computação com ênfase em Sistemas Embarcados). ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

SILVA, Jaqueline F. D. **Sistema de armazenamento de imagens comprimidas através da transformada wavelet**. Dissertação (Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira). ed. Ilha Solteira - SP: Universidade Estadual Paulista, 2008.

SILVA, Milthon S. **Sistema de monitoramento e metodologia de estimativa dos tempos de operação do disjuntor**. Universidade de São Paulo. São Paulo: Tese (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Energia e Automação Elétricas). 2005. p. 116.

SILVA, Murilo D.; OLESKOVICZ, Mário; COURY, Denis V. Uma nova ferramenta baseada na transformada wavelet para localização digital de faltas. **Revista Controle & Automação**, São Carlos - SP, v. 16, n. 3, p. 345 a 358, Agosto e Setembro de 2005.

UKIL, Abhisek; ZIVANOVIC, Rastko. The detection of abrupt changes using recursive identification for power system fault analysis. **Electric Power Systems Research**, 2007. 259–265.

VARELA, Fernando S. et al. Sistema inteligente de gestão de oscilografias. **XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XX SNPTEE)**, Recife - Brasil, 2009. CR-ROM.

WEEKS, Michael. **Processamento Digital de Sinais Utilizando MATLAB e Wavelets**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

WEISZFLOG, Walter. **Michaelis**: moderno dicionário da língua portuguesa. 10. ed. São Paulo: Melhoramentos, 2004.